

Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación
2017-2018

Trabajo Fin de Grado

“Diseño e implementación de un
receptor ILS embarcable en un
DRON”

José Recio Meneses

Tutor

Víctor P. Gil Jiménez

Leganés, 21 de septiembre de 2018



[Incluir en el caso del interés de su publicación en el archivo abierto]

Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons

Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada

RESUMEN

El sistema ILS (Instrumental Landing System) es un sistema de aproximación instrumental utilizado en el sector de la aviación, concretamente, en el momento en el cual, un avión se aproxima a la pista de aterrizaje. Se basa en la utilización de haces de radiofrecuencia que nos permiten obtener la posición del avión tanto en longitud como en latitud (guía horizontal y vertical).

En la actualidad dicho sistema de calibración se realiza mediante un avión de carga, lo que supone un proceso caro y complejo. Por ello, surgió la idea de realizar el presente proyecto, un receptor ILS embarcado en un DRON. Esto supondría un gran ahorro y una menor complejidad del instrumental utilizado.

Se han realizado numerosas pruebas de recepción de señales ILS mediante el instrumental adecuado (Generador de Funciones), además de las pruebas pertinentes mediante el software proporcionado por MATLAB para comprobar el correcto funcionamiento de la demodulación de la señal ILS.

El objetivo final es implementar dicho receptor en tiempo real, para aumentar su eficiencia y su utilidad en el mundo real.

ABSTRACT

The system ILS (Instrumental Landing System) is a system of instrumental approximation used in the sector of the aviation, concretely, in the moment in which, a plane comes closer the runway. It is based on the utilization of radio frequency beams that allow us to obtain the position of the plane both in length and in latitude (horizontal and vertical guide).

Actually the above mentioned system of calibration is done by a freight plane, which supposes an expensive and complex process. For that reason, there arose the idea of making the present project, a receiver ILS embarked in a DRON. This would suppose a great saving and a minor complexity of the used set of instruments.

There have been done numerous tests of reception of ILS signals by means of the suitable set of instruments (Generator of Functions), besides the pertinent tests by means of the software provided by MATLAB to verify the correct functioning of the ILS signal's demodulation.

The final aim is to implement the above mentioned real time receiver to increase his efficiency and his usefulness in the real world.

GLOSARIO

| SIGLAS | SIGNIFICADO |
|--------|---|
| ILS | Instrumental Landing System |
| SDR | Software Defined Radio |
| OACI | Organización de Aviación Civil Internacional |
| VOR | Very High Frequency Omnidirectional Range |
| GBAS | Ground Based Augmentation System |
| VDL | VHF Data Link |
| DSB | Double Side Band |
| AM | Amplitude Modulation |
| UIT | (Unión Internacional de las Telecomunicaciones |
| ETSI | European Telecommunications Standards Institute |
| CNAF | Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias |
| BOE | Boletín Oficial del Estado |
| GPS | Global Positioning System |
| GLS | Global Landing System |
| MLS | Microwave Landing System |
| LOC | Localizer |
| GS | Glide Slope |
| MB | Mark Beacon |

| | |
|---------|--|
| LCD | Liquid Cristal Display |
| DH | Decission Height |
| RVR | Runway Vision Range |
| CAT I | Categoría I |
| CAT II | Categoría II |
| CAT III | Categoría III |
| VHF | Very High Frecuency |
| DDM | Difference in the Depth of Modulation |
| UHF | Ultra High Frecuency |
| OM | Outer Marker |
| MM | Medium Maker |
| IM | Inner Marker |
| CDI | Course Decission Indicator |
| FM | Frecuency Modulation |
| USB | Universal Serial Bus |
| MSPS | Mega Samples Per Second |
| HF | High Frecuency |
| MF | Middle Frecuency |
| HDMI | High Definition Multimedia Interface |
| SSH | Secure SHell |
| D-ILS | Deployable Instrumental Landing System |

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.2. MOTIVACIÓN | 1 |
| 1.3. OBJETIVOS..... | 2 |
| 1.4. DESCRIPCIÓN DEL DOCUMENTO | 2 |
| 2. MARCO REGULADOR | 4 |
| 3. ESTADO DEL ARTE | 6 |
| 3.1 AN/ARN-147(V) | 6 |
| 3.2. MLR 2000 | 7 |
| 3.3. GLU-925..... | 7 |
| 3.4. PIR 361 PORTABLE ILS/VOR RECEIVER..... | 8 |
| 4. INSTRUMENTAL LANDING SYSTEM..... | 9 |
| 4.1. INTRODUCCIÓN | 9 |
| 4.2. CATEGORÍAS ILS | 10 |
| 4.3. LOCALIZADOR | 11 |
| 4.4. SENDA DE PLANEEO | 13 |
| 4.5. RADIOBALIZAS..... | 15 |
| 4.5.1. RADIOBALIZA EXTERIOR (OM)..... | 16 |
| 4.5.2. RADIOBALIZA INTERMEDIA (MM) | 16 |
| 4.5.3. RADIOBALIZA INTERIOR (IM) | 16 |
| 4.6. INSTRUMENTAL DE VUELO | 17 |
| 4.7. PRECISIÓN Y ERRORES | 18 |

| | |
|--|-----------|
| 5. DISPOSITIVOS UTILIZADOS Y ESPECIFICACIONES | 20 |
| 5.1. RASPBERRYPI 3 MODEL B | 20 |
| 5.2. AIRSPY R2 | 21 |
| 5.3. ANTENA DE HILO..... | 22 |
| 6. DESARROLLO DEL RECEPTOR | 24 |
| 6.1. IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE DE RECEPCIÓN ... | 24 |
| 6.2. SIMULACIÓN DE LA RECEPCIÓN Y DEMODULACIÓN... | 26 |
| 6.3. DESARROLLO DEL CÓDIGO DE DEMODULACIÓN EN C31 | |
| 6.4. IMPLEMENTACIÓN DE LA DEMODULACIÓN EN LA | |
| RASPBERRYPI | 32 |
| 6.5. SIMULACIÓN Y DESARROLLO DEL CÁLCULO DE LA DDM | |
| | 32 |
| 6.6. IMPLEMENTACIÓN DE UN SCRIPT DE EJECUCIÓN..... | 33 |
| 6.7. RESULTADOS DE LA EJECUCIÓN..... | 35 |
| 7. ENTORNO SOCIOECONÓMICO..... | 37 |
| 7.1. IMPACTO SOCIOECONÓMICO | 37 |
| 7.2. PRESUPUESTO..... | 38 |
| 7.2.1. COSTES MATERIALES..... | 38 |
| 7.2.2. COSTES DE PERSONAL. | 39 |
| 7.2.3. COSTES DEL SOFTWARE..... | 40 |
| 7.2.4. COSTES TOTALES..... | 40 |
| 8. CONCLUSIONES Y FUTUROS HORIZONTES..... | 42 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA | 44 |
| ANEXO A | |

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El transporte aéreo se ha convertido en pocos años en el más utilizado y fiable. Esto es debido al instrumental embarcado en los aviones, los cuales han sido desarrollados a lo largo de estos últimos años en este sector.

Desde los instrumentos más simples como el Altímetro a otros más complejos como el Sistema de Gestión de Vuelo son necesarios a la hora de llevar a cabo un vuelo cualquiera.

La aviación se ha beneficiado enormemente con la invención del sistema de aterrizaje ILS (Instrumental Landing System). Consiste en un sistema de radio ayudas utilizado desde mediados del siglo XX, que permite calcular el posicionamiento de un avión. Con él, los aterrizajes son totalmente seguros, reduciendo casi por completo el riesgo de producirse algún error en condiciones adversas para el piloto, como pueden ser unas malas condiciones climatológicas.

1.2. Motivación

El desarrollo de nuevas tecnologías cada día se produce más rápido, tanto para la creación de nuevos inventos que permitan hacernos la vida más fácil, como para la optimización de productos ya existentes.

En este caso, tratamos de reducir gastos y tamaño de un dispositivo existente actualmente (receptor ILS). La calibración actual es llevada a cabo con un avión de carga, lo cual es muy costoso. El objetivo es desarrollar un receptor embarcable en un dron, lo que nos proporcionará una mayor operabilidad, además de menor gasto de explotación y unos mayores beneficios.

Los sistemas de aterrizaje son muy necesarios en la actualidad, ya que el más mínimo fallo en un aterrizaje puede provocar posibles víctimas o muertes. Desde el punto de vista

tecnológico, es algo fascinante, ya que nos permite posicionar correctamente el aeroplano a la hora de aterrizar. Y la posibilidad de desarrollar dicha tecnología con un dispositivo no utilizado antes, en un ámbito desconocido para mí, como es la aviación, me permite introducirme en este mundo, y su tecnología.

1.3. Objetivos

El principal objetivo de dicho Trabajo de Fin de Grado es la implementación de un receptor ILS mediante un dispositivo SDR conectado mediante puerto USB a una RaspberryPi. Este objetivo puede desglosarse en otros más pequeños:

- Estudio del sistema de aterrizaje ILS y de los receptores actuales.
- Análisis de los distintos dispositivos del mercado y de sus características con el objetivo de elegir la opción más correcta o en el caso peor, la más eficiente.
- Compra de los dispositivos correspondientes.
- Aprendizaje específico de la funcionalidad de cada uno de los dispositivos, además de la descarga de los drivers necesarios para su funcionamiento.
- Desarrollo del software específico de cada dispositivo.
- Realización de las pruebas sobre el funcionamiento.

1.4. Descripción del documento

- Punto 1: Introducción, motivación y objetivos del proyecto.
- Punto 2: Marco regulador. Posibles leyes y organismos que podrían entrar en juego en la utilización de este proyecto.
- Punto 3: Estado del arte. En este punto se mencionan algunos de los receptores ILS utilizados en el pasado, además de sus especificaciones tales como la precisión o su peso.

- Punto 4: Instrumental Landing System. Amplia introducción y explicación sobre el funcionamiento del sistema de aterrizaje ILS, sus características y sus ventajas.
- Punto 5: Herramientas. Herramientas utilizadas y sus características para el desarrollo de nuestro receptor ILS.
- Punto 6: Desarrollo. Explicación punto por punto sobre la implementación de dicho receptor.
- Punto 7: Marco socioeconómico. Recursos necesarios para el desarrollo del proyecto por parte de una empresa desde el punto de vista económico, además de las retribuciones que deberían recibirse al trabajar en dicha empresa.
- Punto 8: Conclusiones y futuros horizontes.
- Punto 9: Bibliografía
- Anexo A: En el cual se resume este Trabajo de Fin de grado en lenguaje anglosajón.

2. MARCO REGULADOR

La OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) [1], es uno de los principales organismos internacionales, encargado de estudiar los problemas de la aviación actual, de la imposición de normas y reglamentos en la aeronáutica mundial, además de fomentar el desarrollo y la seguridad.

Dicho organismo se ocupa de la gestión de bandas de frecuencias destinadas al tránsito aéreo. Las bandas de frecuencias referentes a la aviación son las siguientes [2]:

- (190-1750KHz) Narrow Band.
- (108-117.975MHz) Localizador ILS, VOR, GBAS, VDL.
- (117.975-137MHz) DSB/AM, VDL.
- (960-1215MHz) DME.
- (5030-5091MHz) MLS.

La información relevante a la asignación de frecuencias aeronáuticas se encuentra en el Anexo 10 al Convenio sobre Aviación Civil Internacional, Volumen V [3] (Utilización del espectro de radiofrecuencias aeronáuticas), concretamente en los capítulos 3 y 4. Pero es el Volumen I [4] donde encontramos la información referente a las frecuencias ILS, su cobertura, radiofrecuencias, especificaciones, estructura, precisión y algunas recomendaciones.

Su atribución dependerá en la mayoría de los casos de acuerdos geográficos, aunque en muchos casos se reservarán a fines del estado.

La UIT (Unión Internacional de las Telecomunicaciones) es un organismo, cuyo objetivo principal es armonizar las telecomunicaciones a nivel internacional. El ETSI (European Telecommunications Standards Institute) es otro organismo, que pretende la cooperación en el terreno comercial, regulador y de especificación técnica.

Ambos organismos están involucrados en la administración del CNAF (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias). Se establecía en el artículo 60 de la ley 9/2014 del 9 de mayo, General de Telecomunicaciones [5], que el espectro radioeléctrico era administrado por el Estado, aun siendo un bien de uso público. Pero es en el artículo 6 de dicha ley cuando el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital crea el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias para la utilización coordinada de este bien público.

La información sobre el CNAF puede encontrarse en el BOE (Boletín Oficial del Estado), número 259 del 27 de octubre de 2017. Su referencia es BOE-A-2017-12318 [6].

En este caso, tenemos que tener en cuenta que el uso de nuestro dispositivo es algo innovador, por lo que hay que proteger nuestros derechos y privilegios. Para ello podemos recurrir a una patente, la cual nos dotará del derecho de explotar dicho invento en exclusiva.

Todas las normas en torno a las patentes son recogidas en la ley 11/1986 del 20 de marzo. Dicha ley se encuentra publicada en el BOE (Boletín Oficial del Estado), número 73, de 26 de marzo de 1986 (páginas 11188-11208) [7].

3. ESTADO DEL ARTE

Este capítulo hará referencia a los dispositivos ILS que existen en la actualidad. Se describirá su funcionamiento, especificaciones y la diferencia con nuestro receptor. Esto nos permitirá ver el cambio evolutivo de los dispositivos en tan solo unos pocos años y su mejora constante.

3.1 AN/ARN-147(V)



Figura 1. Receptor AN/ARN-147(V) [8]

Este dispositivo fue llevado a cabo por la empresa estadounidense Rockwell Collins, la cual ofrece sistemas de tecnología aeronáutica, además de información a empresas gubernamentales y fabricantes de aviones.

Su peso es de unos 4,6 kg, un dispositivo bastante pesado y consume cerca de 45 watts. Ofrece 160 canales VOR (Very High Frequency Omnidirectional Range) y 40 ILS. Proporciona también un espaciado de canal de 50KHz y además fue diseñado principalmente para uso militar [8].

3.2. MLR 2000



Figura 2. Receptor MLR 2000 [9]

Este dispositivo fue desarrollado por la empresa estadounidense Bae System, la cual, se dedica principalmente a la construcción aeronáutica, además de ser uno de los mayores contratistas militares del mundo.

Se trata de un dispositivo multimodo, que soporta ILS, VOR, GPS (Global Positioning System), GLS (Global Landing System), MLS (Microwave Landing System). Se caracteriza por su robustez, lo que aporta una mayor modularidad y flexibilidad para adaptarse a los futuros cambios [9].

3.3. GLU-925



Figura 3. Receptor GLU-925 [10]

Este receptor fue diseñado por la empresa Rockwell Collins. Soporta ILS Categoría III, GLS Categoría I y RNAV/RNP. Su peso no va mucho más allá de los 4 kg. Además, dicho dispositivo está equipado en el Airbus A350, A380 y en el Boeign 747-8 [11].

3.4. PIR 361 Portable ILS/VOR Receiver



Figura 4. PIR 361 Portable ILS/VOR Receiver [12]

Este dispositivo fue diseñado por la empresa coreana Kavics, la cual, se dedica al diseño de receptores ultraligeros portátiles. Es una empresa poco asentada aún [13].

El PIR 361 es un receptor de medición para LOC, GS (Glideslope), VOR, MB (Marker Beacon). Es considerado uno de los más pequeños y rápidos procesadores de datos en el ámbito de ILS del año 2016. Su peso es de 1,4 kg, por lo que es bastante ligero. Además, posee una pantalla LCD, que permite una mayor operabilidad del dispositivo [12].

La Raspberry Pi 3B, es un dispositivo de apenas un peso de 45 gramos, que junto con un SDR (Software Defined Radio), nos permitirá tener un receptor funcional embarcable en cualquier plataforma por muy pequeña que sea.

4. INSTRUMENTAL LANDING SYSTEM

4.1. Introducción

La fase del aterrizaje es una de las más delicadas en el ámbito de la aviación, ya que cualquier fallo puede provocar un grave accidente. Si a esto le sumamos el hecho de que pueden surgir complicaciones meteorológicas tales como la niebla o la lluvia, puede resultar casi imposible realizar la maniobra de aterrizaje. Por ello surgió el sistema de radio ayudas ILS, el cual permite que un avión pueda ser guiado con la mayor precisión durante la fase de aterrizaje.

El ILS se compone de dos señales. Una nos proporciona una guía lateral, mientras que la otra nos proporciona una guía vertical [14]. Con estas dos señales es capaz de posicionar la aeronave incluso en las mayores situaciones climatológicas adversas.

El sistema ILS utiliza distintos componentes durante el proceso de aterrizaje antes y después de llegar a la pista como el localizador, la senda de planeo y las radiobalizas. Podemos apreciar dichos componentes en la Figura 5.

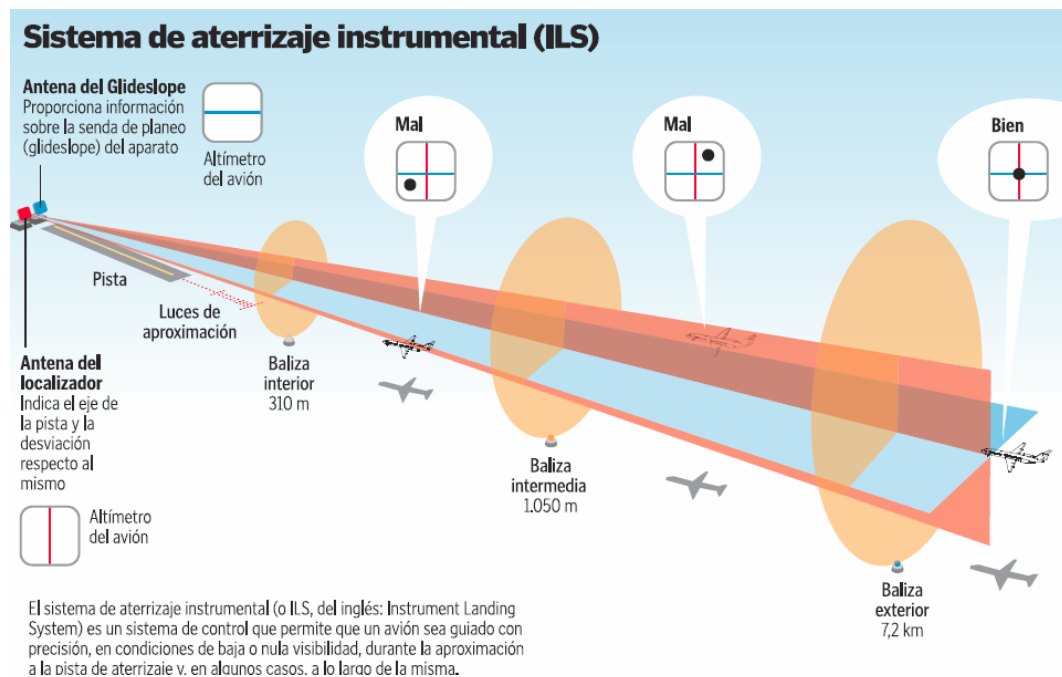


Figura 5. Descripción Sistema ILS [15]

La ICAO (Internacional Civil Aviation Organization) u OACI (Organización de Aviación Civil Internacional) fue la encargada de integrar dicho sistema en 1947 [16].

4.2. Categorías ILS

La OACI define unos márgenes de visión a la hora de aterrizar teniendo en cuenta la proximidad, categoría I, II y III.

Los parámetros que definen las categorías son, la altura de decisión DH (Decission Heigh) y el alcance visual de la pista de aterrizaje o RVR (Runway Vision Range). La altura de decisión es aquella a la cual puede llevarse a cabo una maniobra de aproximación frustrada al no haber contacto visual [17]. El alcance visual de la pista de aterrizaje es la distancia límite hasta donde pueden verse las luces y señales de la pista de aterrizaje que la delimitan [18].

Categorías:

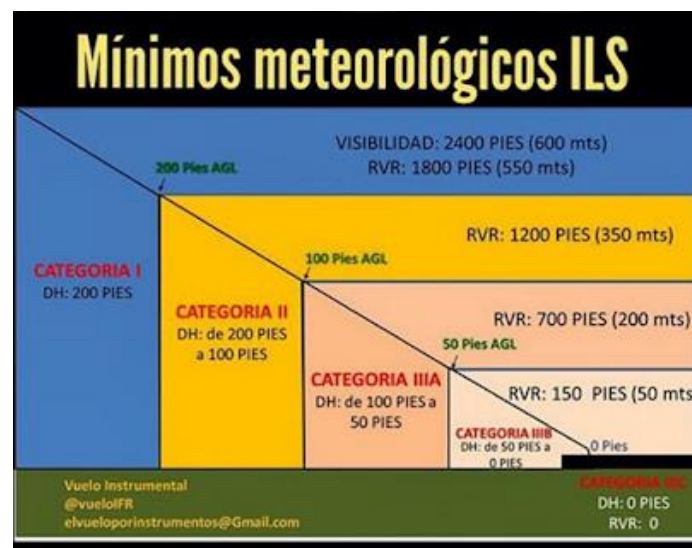


Figura 6. Esquema de las Categorías ILS [19]

- Categoría I (CAT I). Se corresponde con una visibilidad mínima (RVR) de 2600 pies, y un mínimo de 200 pies de techo de nubes.
- Categoría II (CAT II). Se corresponde con una visibilidad mínima de 1200 pies, y 100 pies de altura de decisión a la hora de aterrizar.

Los sistemas de CAT II/III permiten realizar maniobras en visibilidad casi cero, aunque son necesarias una serie de certificaciones tanto por parte del avión como de la tripulación.

- Categoría III (CAT III). Se corresponde con una altura de decisión nula, es decir, 0 pies de altura de decisión a la hora de aterrizar. Esta categoría se subdivide en tres categorías, A, B y C.
 - Categoría IIIa (CAT IIIa). Con una visibilidad mínima de 700 pies.
 - Categoría IIIb (CAT IIIb). Con una visibilidad mínima de 150 pies.
 - Categoría IIIc (CAT IIIc). Con una visibilidad mínima de 0 pies.

Esta categoría depende del piloto automático, ya que, al tener una altura de decisión nula, es casi improbable que un piloto pueda maniobrar a tiempo para poder aterrizar. [19] [14]

El sistema de aproximación ILS está conformado de tres principales componentes, el localizador, la senda de planeo y las radiobalizas, los cuales son explicados en los puntos 4.3, 4.4 y 4.5 respectivamente.

4.3. Localizador

Se trata de un array de antenas (conjunto de varias antenas dispuestas en la misma dirección, sumando sus señales) situado al final de la pista de aterrizaje, más concretamente a 1000 pies del final de la pista. El localizador proporciona un guiado lateral a la aeronave mediante la transmisión de dos señales.

Esta serie de antenas transmiten en la banda VHF entre las frecuencias de 108,10MHz y 111,95MHz, las cuales, son las mismas que las transmitidas por un sistema de radio ayuda denominado VOR (Very High Frequency Omnidirectional Range). [14] [20]

En la siguiente figura podemos apreciar el aspecto de este conjunto de antenas dispuestas en la pista de aterrizaje.



Figura 7. Localizador ILS [21]

El posicionamiento horizontal se lleva a cabo mediante la emisión de dos señales moduladas en amplitud (AM modulation). Las frecuencias de las portadoras son 90Hz y 150Hz. Podemos apreciar el diagrama de emisión en la Figura 8 [14].

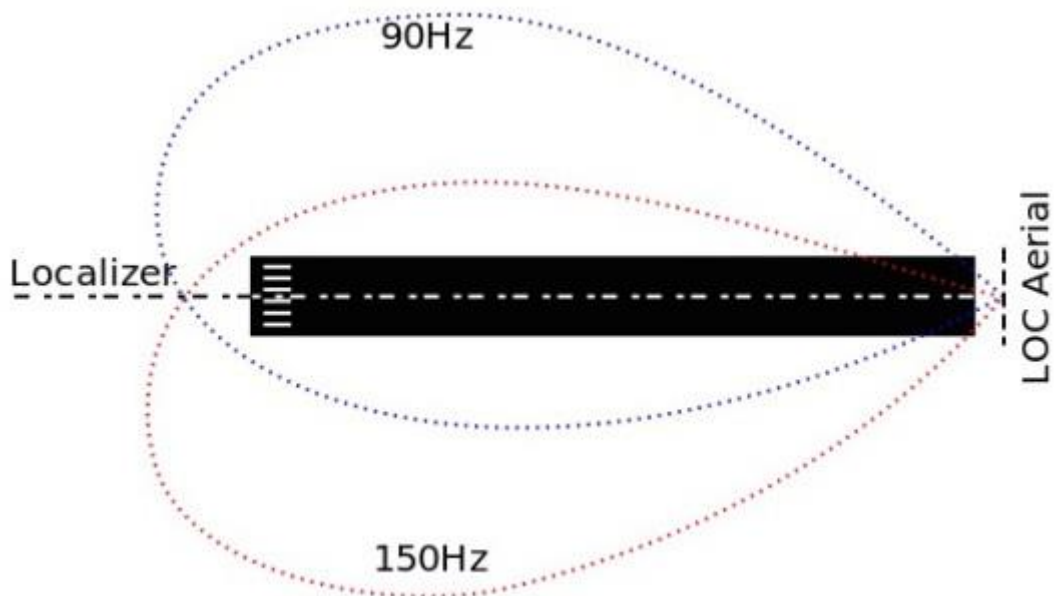


Figura 8. Esquema de los haces de las señales que conforman el Localizador [22]

La predominancia de una señal sobre la otra nos proporciona información sobre donde se encuentra la aeronave. Si la señal de 90Hz predomina, significa que la aeronave se encuentra posicionado más a la izquierda, mientras que si predomina la señal de 150 Hz significa que la aeronave se encuentra más a la derecha.

Mediante el cálculo de la diferencia en la profundidad de la modulación o más conocido como DDM (Difference in the Depth of Modulation), podemos posicionar la aeronave. Si esta se encuentra en el eje de la pista, es decir donde se cruzan y unen las señales de 90Hz y 150Hz, la DDM tendrá un valor de cero.

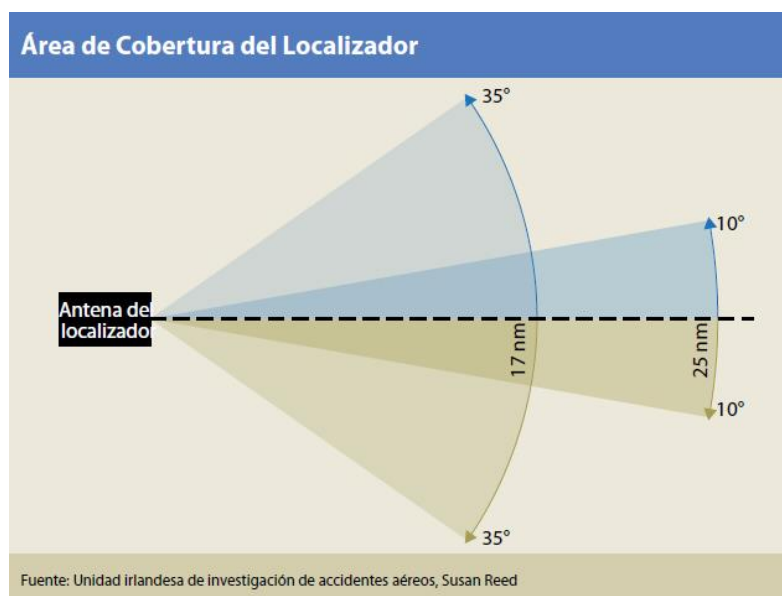


Figura 9. Rango de cobertura del Localizador [23]

4.4. Senda de planeo

Se trata de un conjunto de antenas situadas a 300 metros del principio de la pista de aterrizaje, y dispuestas verticalmente. La torre de antenas mide sobre unos 20pies de altura. Su función principal es proporcionar un posicionamiento vertical de la aeronave. Se genera una señal similar a la del Localizador, pero rotada 90 grados.

Esta torre de antenas actúa como una superficie reflectante de las ondas electromagnéticas, por lo que, si la superficie está cubierta, por ejemplo, con nieve, afectaría a la señal de senda de planeo y deberá ser monitorizada. Además, hay que tener en cuenta la altura de dicha torre ya que cambia el plano de reflexión de las ondas. [14]



Figura 10. Senda de Planeo [24]

Al igual que el localizador, radia dos señales, una con una modulación AM de 90Hz y otra con una modulación AM de 150Hz. La antena de la senda de planeo a diferencia del localizador transmite en un rango de frecuencias entre 328.6MHz y 335.4Mhz (UHF). [20]

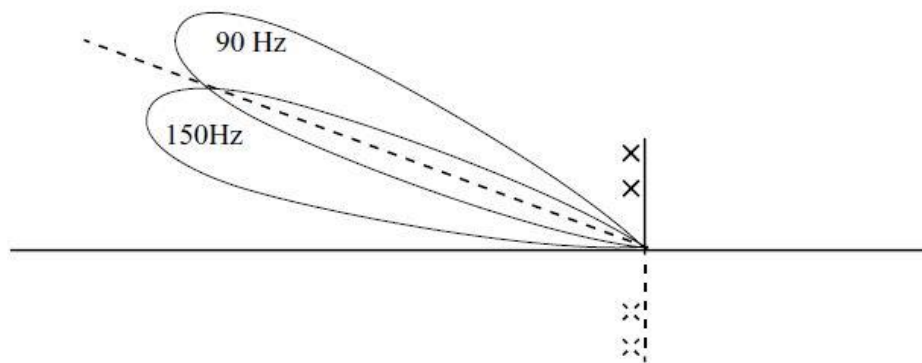


Figura 11. Esquema de los haces de las señales de la Senda de Planeo [14]

El ángulo de la trayectoria de planeo debe encontrarse entre los 2 y 4 grados respecto a la horizontal, siendo el ángulo de descenso más utilizado, los 3 grados.

4.5. Radiobalizas

Las radiobalizas son un sistema de radio ayudas, ubicadas a lo largo de la senda final de aproximación ILS para detallar el posicionamiento de una determinada zona. Operan en un rango de frecuencias VHF de 75 MHz, es decir, a una baja potencia. Suelen apreciarse visualmente en el instrumental del avión, o también sonoramente, dependerá del avión y su instrumental a bordo [19].

Normalmente se utilizan dos radiobalizas, OM (Outer Marker) y MM (Medium Marker), aunque en algunos casos, también se utiliza una última radiobaliza llamada IM (Inner Marker). Podemos apreciar la disposición de dichas balizas en el esquema de la Figura 12 [14].

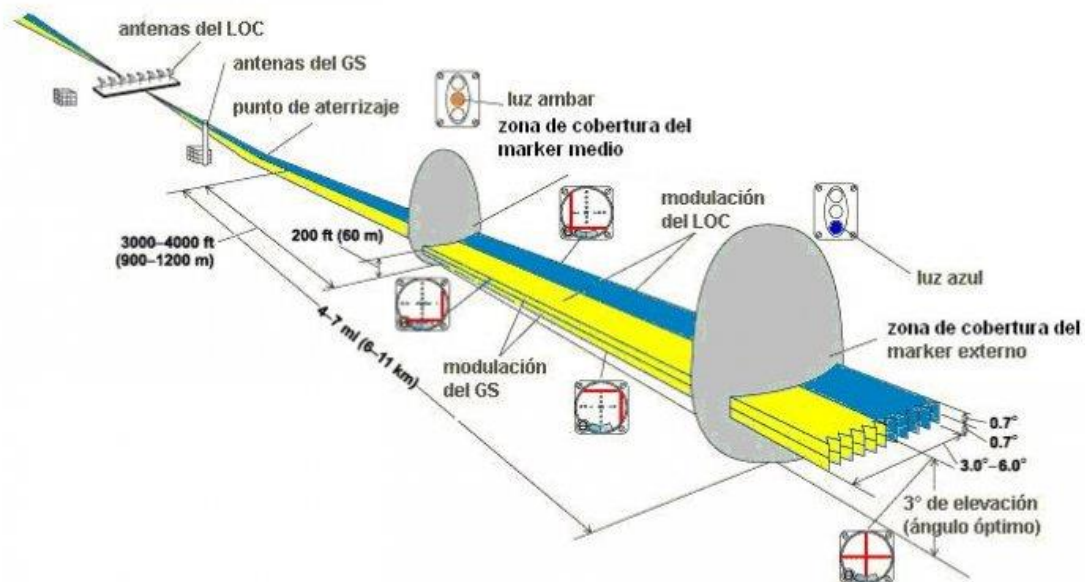


Figura 12. Esquema representativo de las radiobalizas y las distancias a las que se encuentran [25]

4.5.1. Radiobaliza exterior (OM)

Esta radiobaliza se encuentra situada entre 4 y 7 millas del principio de la pista de aterrizaje y marca el principio del aterrizaje. La señal está modulada con un tono de 400Hz que se representa con un conjunto de rayas continuas (código morse), y emite una señal luminosa de color azul [19].

4.5.2. Radiobaliza intermedia (MM)

La radiobaliza intermedia o MM, se encuentra dispuesta a unos 3000 pies (aproximadamente 1 kilómetro) del principio de la pista de aterrizaje. La señal está modulada con un tono de 1300Hz, que es representada con puntos y rayas alternativamente, y emite una señal luminosa de color ámbar [19].

En esta posición o relativamente cercana a ella, se alcanzan los mínimos publicados de la Categoría I (CAT I).

4.5.3. Radiobaliza interior (IM)

Esta radiobaliza no es utilizada en todos los aeropuertos, hay algunos en los que solo se disponen de las radiobalizas exterior e intermedia.

Se encuentra situada entre los 200 y 1500 pies del principio de la pista de aterrizaje. Su señal está modulada con un tono de 3000Hz, y es representada con una consecución de puntos. Además, emite una señal luminosa de color blanco.

Se encuentra únicamente integrada para las Categorías II y III (CAT II/III) [19].

Las radiobalizas emiten un haz vertical, el cual solo es apreciable por la aeronave cuando esta se posiciona sobre él. Podemos apreciarlo en la siguiente figura, en la cual, no hay radiobaliza interior, pero el concepto queda bastante claro [14].

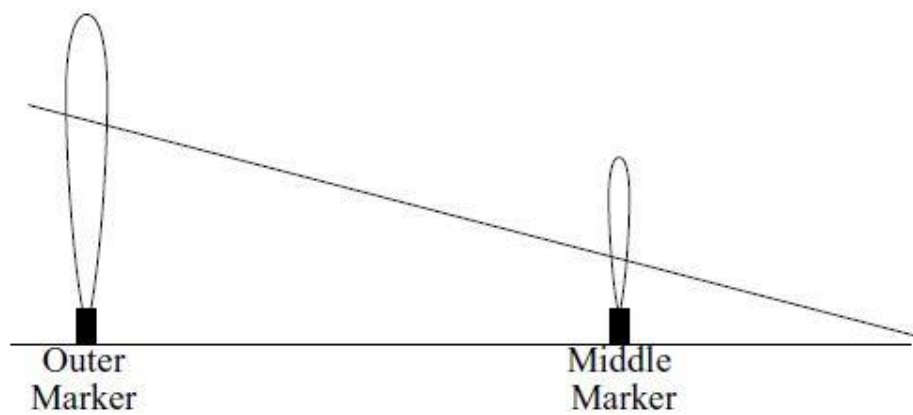


Figura 13. Haces de las señales producidas por las radiobalizas externa y media [14]

4.6. Instrumental de vuelo

El instrumento utilizado en la cabina de las aeronaves para el sistema ILS, es el CDI (Course Deviation Indicator). Este aparato permite al piloto realizar un proceso parecido al cálculo del DDM, pero ofreciéndole una representación visual y más sencilla que un diagrama de radiación o un simple resultado matemático.

Está compuesto por dos barras, una vertical y otra horizontal. La barra vertical se corresponde con el localizador, mientras que la barra horizontal con la de la senda de planeo.



Figura 14. CDI [26]

Cuando ambas barras están dispuestas como en la Figura 14, la aeronave se encuentra en la senda correcta. Pero ¿qué ocurre cuando nuestra aeronave no está posicionada correctamente?

En cuanto a la barra vertical (localizador), si la aeronave se encuentra posicionada más a la derecha de lo que debería estar, la barra vertical se desplaza hacia la izquierda. Y si la aeronave se sitúa a la izquierda de la senda correcta, la barra se desplaza a la derecha.

La barra horizontal (senda de planeo), sufre un comportamiento similar, pero desplazándose arriba o abajo según el posicionamiento de la aeronave. Si esta se encuentra desviada hacia arriba, la barra se desplaza hacia abajo, y si está desplazada hacia abajo, la barra se desplaza hacia arriba.



Figura 15. Conjunto de posibilidades en las que puede verse una aeronave y su visualización en el CDI [27]

Este dispositivo posee también un indicador denominado NAV, el cual indica al piloto si las señales ILS son muy débiles, si están fuera del rango o si el CDI se encuentra apagado. Todo ello permite al piloto saber si puede o no confiar en dicho instrumento de vuelo.

4.7. Precisión y errores

La principal fuente de error de los sistemas ILS está causado por las reflexiones no deseadas que se producen en la señal. Estas son causadas por las irregularidades del terreno, las cuales provocan graves variaciones en las oscilaciones de los indicadores.

Las reflexiones no deseadas también suelen o pueden producirse debido a los edificios, la propia arquitectura del aeropuerto, los hangares o incluso por el follaje [14]. Por todo ello la ICAO, establece unos niveles máximos de desviación.

Además, las señales ILS pueden sufrir graves problemas de interferencias, que diferenciamos dos tipos. Interferencia de tipo A, que es provocada por uno o varios transmisores en la banda aeronáutica. Y interferencia de tipo B, que es aquella provocada por transmisores fuera de la banda aeronáutica [28].

Se pueden dar otra serie de problemas con el instrumental a bordo, ya sea ruido en el receptor, error en el centrado de agujas o incluso interferencias de señales FM comerciales. Lo que puede provocar desviación del sistema de referencia o pérdida de señal.

La precisión del localizador depende de las categorías ILS:

- CAT I: 0.29°.
- CAT II: 0.2°.
- CAT III: 0.08°.

Mientras que la senda de planeo dispone de una precisión de:

$$0.056 * x$$

Donde “x” es el ángulo nominal de la senda de planeo [14].

5. DISPOSITIVOS UTILIZADOS Y ESPECIFICACIONES

Para ser posible la realización de este Trabajo de Fin de Grado han sido necesarias una serie de herramientas, buscando la mayor eficiencia y el menor coste posibles. Para ello fue necesario un análisis previo de las tecnologías actuales y pasadas.

Las herramientas de las que hemos dispuesto finalmente son, una RaspberryPi 3 model B, un SDR (Software Defined Radio) denominado Airspy R2, y una pequeña antena de hilo, los cuales describiremos en más detalle a continuación.

5.1. RaspberryPi 3 model B

Este dispositivo es considerado como un ordenador en miniatura, ya que permite emular su comportamiento con un tamaño mucho más reducido, lo cual, es una grandísima ventaja para realizar cualquier proyecto y menor capacidad de procesamiento, aunque suficientemente grande para realizar costosas operaciones computacionales.



Figura 16. RaspberryPi 3B [29]

En realidad, es una placa de ordenador conformada por un procesador Broadcom, una RAM, una GPU, varios puertos USB, HDMI, Ethernet, 40 pines GPIO, conector de

cámara y jack de 3.5 mm para dispositivos de audio. La memoria ROM es insertada por medio de una tarjeta SD que en este caso tiene una memoria de 8GB (GigaBytes).

Además de estos componentes, este modelo de Raspberry incluye también conexión Wifi y conexión Bluetooth, lo que nos facilita mucho cualquier tarea que realicemos con ella.

Este dispositivo utiliza un sistema operativo denominado Raspbian, el cual, es una adaptación del conocido sistema operativo Debian. Por lo que, disponiendo de conocimientos previos de Linux, este sistema operativo no debería suponernos una gran dificultad.

Como he comentado antes, su procesador debería permitirnos realizar operaciones computacionalmente costosas, debido a sus 1.2GHz con 64 bits de CPU, y sin olvidarse claramente de su capacidad de 1GB de RAM [30]. Por ello es considerada una de las mejores opciones para el pre y post procesamiento de datos. En nuestro caso nos ha facilitado el post procesamiento de datos enormemente, ahorrando tiempo y espacio.

5.2. Airspy R2

Se trata de un dispositivo con un determinado sistema SDR, denominado Airspy. Un dispositivo SDR es un dispositivo de radiocomunicación donde varios de sus componentes han sido implementados en software por medio de un ordenador o un sistema embebido [31].



Figura 17. Airspy R2 [32]

Es posible el acople de una antena a este dispositivo, lo cual nos permite recibir y emitir señales en una banda de frecuencia muy amplia. Además, se trata de un dispositivo de medidas bastante pequeñas, lo que nos proporciona una mayor movilidad del dispositivo y una mayor facilidad de uso.

Este dispositivo se conecta mediante un cable USB a otro dispositivo, en este caso una RaspberryPi para procesar datos, o bien puede conectarse a otros dispositivos como el propio ordenador para monitorizar señales en determinadas frecuencias. También cabe añadir, que es soportado por la gran mayoría de plataformas, desde Windows 10 a Linux.

El Airspy nos permite recibir en bandas de frecuencias entre 24 y 1700MHz con unas tasas de muestreo de entre 2.5 y 10MSPS (Mega Sample Per Second) para señales IQ, aunque nos conviene utilizar la tasa menor, en este caso 2.5MSPS para dispositivos como la Raspberry, debido ser dispositivos de baja potencia. Además, posee una entrada de reloj externo de entre 10 y 100MHz [32].

5.3. Antena de hilo

Se trata de un dispositivo capaz de emitir y o recibir ondas electromagnéticas durante transmisiones AM o FM. En este caso las antenas de hilo son usadas muy comúnmente en las bandas de VHF, UHF, HF y MF, además sus elementos radiantes son conductores de hilo [33].



Figura 18. Antena de hilo [34]

Es acoplado a un extremo del Airspy, mediante un sistema de rosca para permitirnos captar o emitir cualquier señal dentro de un determinado rango de frecuencias.

6. DESARROLLO DEL RECEPTOR

6.1. Implementación del software de recepción

En primer lugar, se procedió a desarrollar un software para la Raspberry, que nos permitiera recibir la señal ILS y poder almacenarla en la misma en un formato de archivo wave.

Tras analizar detenidamente la posibilidad de implementar el software por mi cuenta, se llegó a la conclusión de que era una tarea bastante complicada y laboriosa. Es por ello por lo que se decidió recurrir a una plataforma de código libre denominada GitHub [35]. En ella encontramos unos drivers y un código, los cuales, nos permitían la recepción con el Airspy R2.

Para descargar e instalar todo ello, uno de los archivos llamado “README.md”, nos proporcionaba la información suficiente para su correcta descarga e instalación. Se muestran las acciones secuenciadas llevadas a cabo en la siguiente Figura.

```
wget https://github.com/airspy/airspyone_host/archive/master.zip  
  
unzip master.zip  
  
cd airspyone_host-master  
  
mkdir build  
  
cd build  
  
cmake ../ -DINSTALL_UDEV_RULES=ON  
  
make  
  
sudo make install  
  
sudo ldconfig
```

Figura 19. Conjunto de comandos llevados a cabo para la descarga del código precedente y la instalación de los drivers [35]

Tras ello se procedió a una pequeña modificación del código. Esto era debido a la recepción continua que realizaba el programa, y nuestro objetivo era la recepción de una señal en el menor tiempo posible (en este caso entre uno y dos segundos) para evitar factores degradantes tales como el ruido.

Para la ejecución de dicho programa, primero vamos a explicar cómo podría llevarse a cabo desde la Raspberry. Podemos optar por dos formas, la primera, mediante la conexión del dispositivo mediante un cable hdmi a un monitor y desde ese punto ejecutar el terminal desde la interfaz visual proporcionada. O optar por la segunda, que consiste en una conexión ssh mediante un programa denominado “Putty”, el cual nos permitirá conectarnos a la Raspberry de manera remota desde nuestro propio ordenador. Esta última forma ha sido la más utilizada en este proyecto debido a su simplicidad.

En cuanto a la ejecución desde el terminal es bastante sencilla. Este programa espera el paso de una serie de parámetros por la línea de comandos. Los más utilizados de acuerdo con el seguimiento de nuestros objetivos han sido, “*f*”, el cual nos permite establecer la frecuencia en la cual el dispositivo inicia la recepción. La opción “*-w*”, crea un archivo de salida de formato wave, en el cual, la señal recibida por el dispositivo es almacenada. Y la opción “*-a*”, la cual, nos permite establecer el número de muestras por segundo, pudiendo escoger entre dos opciones, cero o uno. Si optamos por cero, el número de muestras que son tomadas por segundo son 10MSPS (Mega Samples Per Second), y si en cambio optamos por pasar un uno por la línea de comandos, son tomadas 2.5MSPS (esta última configuración ha sido la utilizada en todo momento).

Por tanto, una simple ejecución del programa podría realizarse de la siguiente manera. Desde la carpeta “*/home/pi/airspyone-host_master/build/airspy-tools/src*” llevar a cabo el siguiente comando “*./airspy_rx -w -f f(frecuencia de recepción) -a 1*”. Como consecuencia se creará un archivo con formato wave en el mismo directorio en el que se ha llevado a cabo la ejecución con un nombre específico, que consta de varios campos, el nombre del dispositivo, el sello temporal en un determinado formato de fecha, la frecuencia en la que se ha procedido a la recepción por parte del receptor y el tipo de muestras tomadas.

El siguiente paso, consistía en demodular la señal almacenada mediante el programa matemático denominado MATLAB. Es decir, llevar a cabo la simulación de una demodulación AM para comprobar el correcto funcionamiento del receptor.

6.2. Simulación de la recepción y demodulación

A continuación, se procedió a la recopilación de una serie de señales para su análisis tanto temporal como en frecuencia mediante el programa MATLAB. Las señales recibidas, no eran ILS, ya que no se disponía de las herramientas necesarias para su generación, ni de permisos para su captación en los aeropuertos. Por tanto, se trataba de simples senos o señales cuadradas, con las cuales, poníamos a prueba la correcta recepción del receptor. Aunque, más tarde con la ayuda de otra compañera se consiguió la captación de señales ILS.

En la siguiente Figura 20 podemos apreciar una de las primeras señales captadas por nuestro receptor, en este caso un seno en una frecuencia de 112.2MHz. Para la lectura del archivo wave generado, MATLAB proporciona una función llamada “audioread()” [36], la cual devuelve las muestras y la frecuencia de muestreo de la señal, proporcionándole primero el nombre del archivo y su ruta.

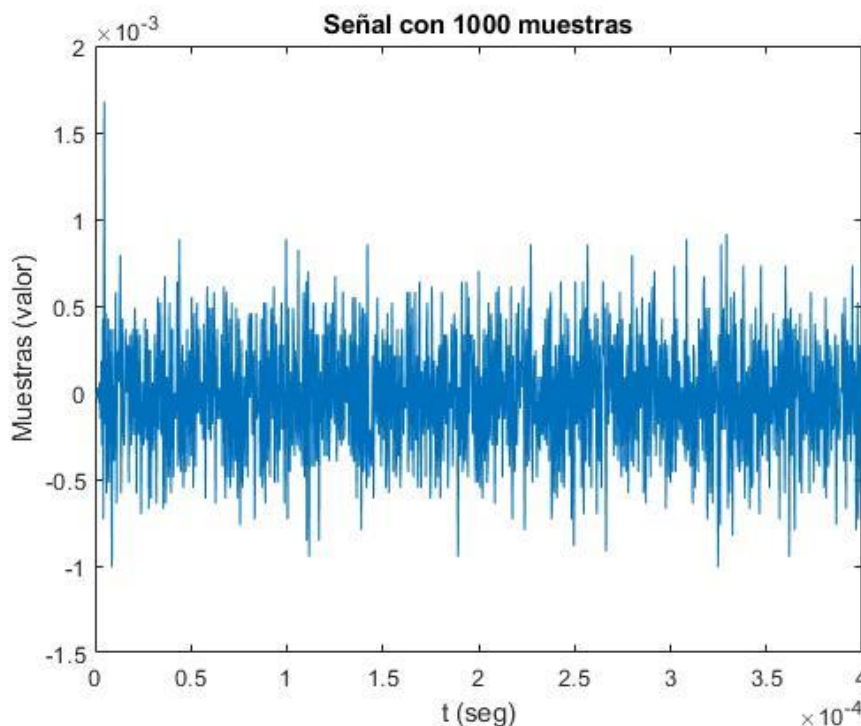


Figura 20. Representación de un seno recibido por el receptor en una frecuencia de 112.2MHz. Se tomaron 1000 muestras de la señal original. El eje x se corresponde con el tiempo y el eje y, con el valor de la muestra.

En estas primeras señales recibidas, tuvimos varios problemas producidos por el ruido. Posiblemente por la posición de las antenas, tanto la emisora como la receptora y a la configuración del generador de señales del laboratorio. Una de las soluciones propuestas fue la reducción del tiempo de captura de la señal, ya que en un primer instante el receptor escuchaba en torno a unos 30 segundos, lo que permitía la captación de un mayor ruido y distintas fluctuaciones. Además, la frecuencia de recepción era muy cercana a la banda FM, lo que incrementaba las posibilidades de la aparición de interferencias.

Podemos apreciar también el análisis en frecuencia realizado de esta señal en la siguiente Figura.

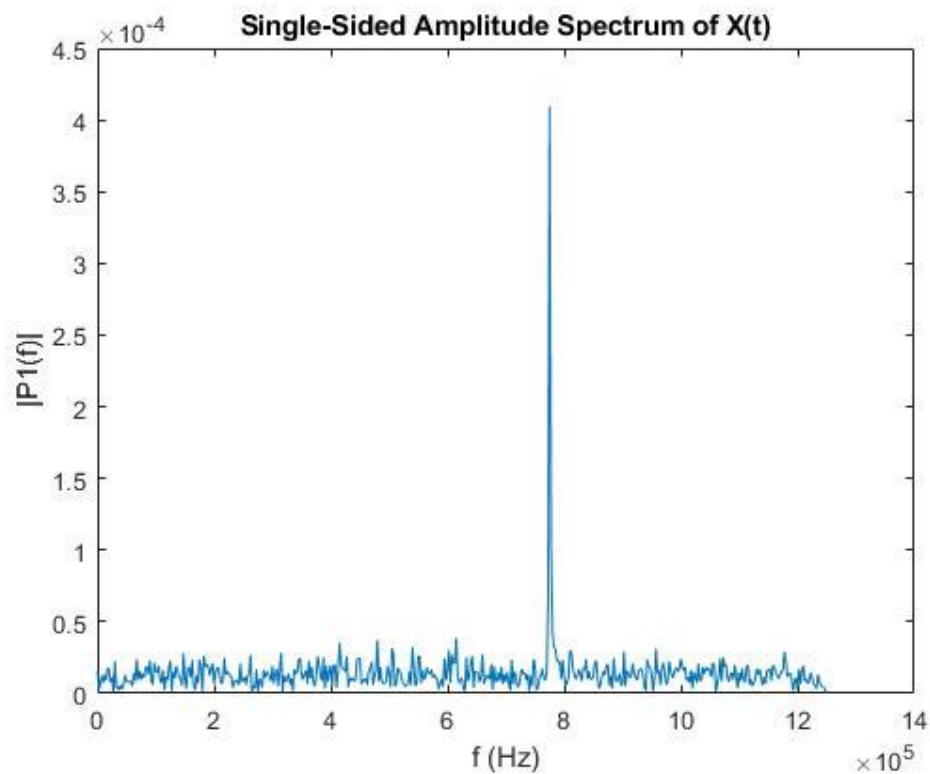


Figura 21. Espectro del seno recibido. Se han tomado 1000 muestras de la señal original.

Una vez comprobada la correcta recepción de las señales, se procedió a simular la demodulación. Para ello, se plantearon dos opciones, mediante la Transformada de Hilbert o mediante la función definida en MATLAB, “amdemod” [37].

En un primer instante, la opción más beneficiosa era utilizar la Transformada de Hilbert, ya que no suponía una gran dificultad el desarrollo del código en MATLAB, además de

existir dicha función ya implementada en otros lenguajes, lo que nos ahorraría tiempo en la implementación de la demodulación en la RaspberryPi.

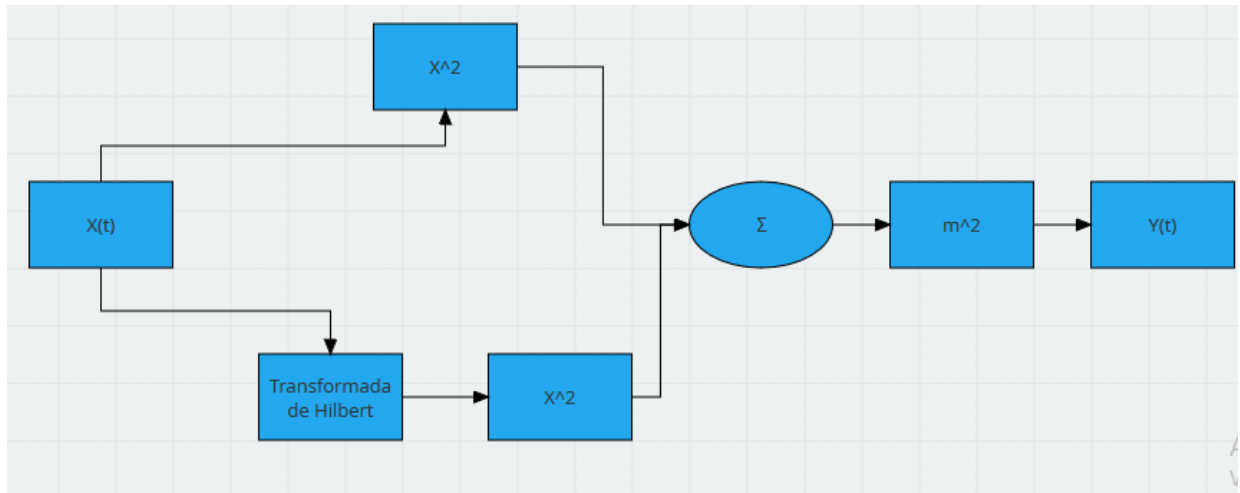


Figura 22. Diagrama de Bloques de la demodulación mediante la Transformada de Hilbert

En la Figura 22, se muestra el diagrama de bloques de la demodulación llevada a cabo mediante la Transformada de Hilbert, ya que esta transformada nos permite realizar una detección de envolvente. Para ello por un lado se eleva al cuadrado la señal y por otro lado se realiza la Transformada de Hilbert de la señal con su posterior elevación al cuadrado. Tras ello se procede a la suma aritmética de ambas señales. Y, por último, se procede a la elevación al cuadrado de la señal resultante.

Pese a que los resultados obtenidos no fueron del todo malos, nos decantamos por la simulación mediante la función “amdemod”, la cual, ya incluía un filtro paso bajo para la eliminación de las altas frecuencias, siendo no necesario recurrir a una función, o la creación de un código que eliminara o suavizara dichas frecuencias.

Como se ha comentado con anterioridad, no se dispuso de señales ILS, debido a la ausencia de generador de señales de este tipo, y por la no posesión de permisos para la captación de estas señales en un aeropuerto.

Gracias a mi compañera Victoria Sousa Fernández y su Trabajo de Fin de Grado [38], en el cual generaba un conjunto de señales ILS en el laboratorio mediante MATLAB, pude disponer de recursos necesarios para las pruebas.

Continuando con las simulaciones, se procedió a la recepción de las señales ILS, las cuales son el objetivo de este receptor. En la Figura 23 podemos apreciar una de estas señales en el dominio del tiempo.

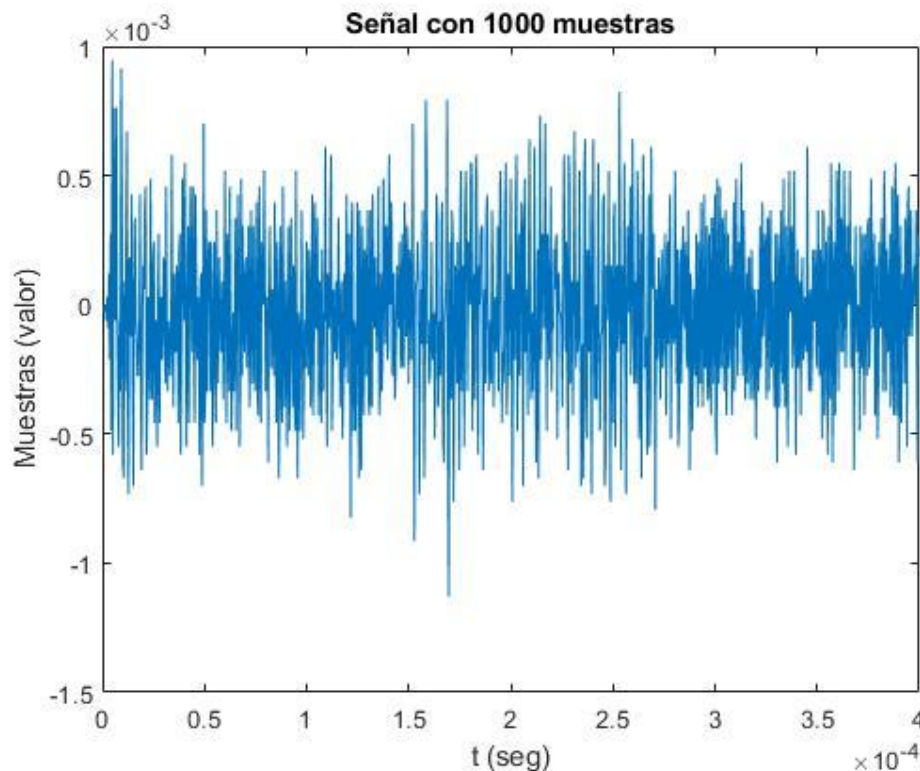


Figura 23. Señal ILS recibida en la frecuencia 108.9MHz. Se tomaron 1000 muestras de la señal original.
El eje x se corresponde con el tiempo y el eje y, con el valor de la muestra

Antes de realizar la simulación de la demodulación, se procedió a llevar a cabo un análisis en frecuencia de la señal. Para ello se simuló su espectro el cual, podemos apreciar en la Figura 24.

Finalmente se llevó a cabo la ejecución de la función integrada por MATLAB, “amdemod”, la cual, recibe como parámetros la frecuencia de muestreo, la frecuencia de corte y las muestras de la señal original (no en este orden concretamente). Y devuelve un array de muestras correspondientes a la señal demodulada.

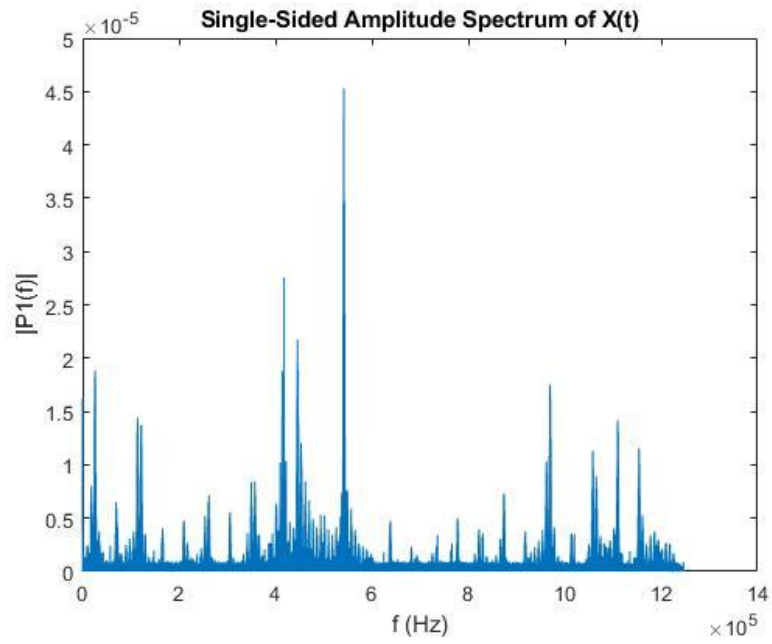


Figura 24. Espectro de la señal ILS original

La realización de la simulación de la demodulación se llevó a cabo representando 1000 muestras de tan solo uno de los dos canales. Podemos apreciar los resultados en la Figura 25.

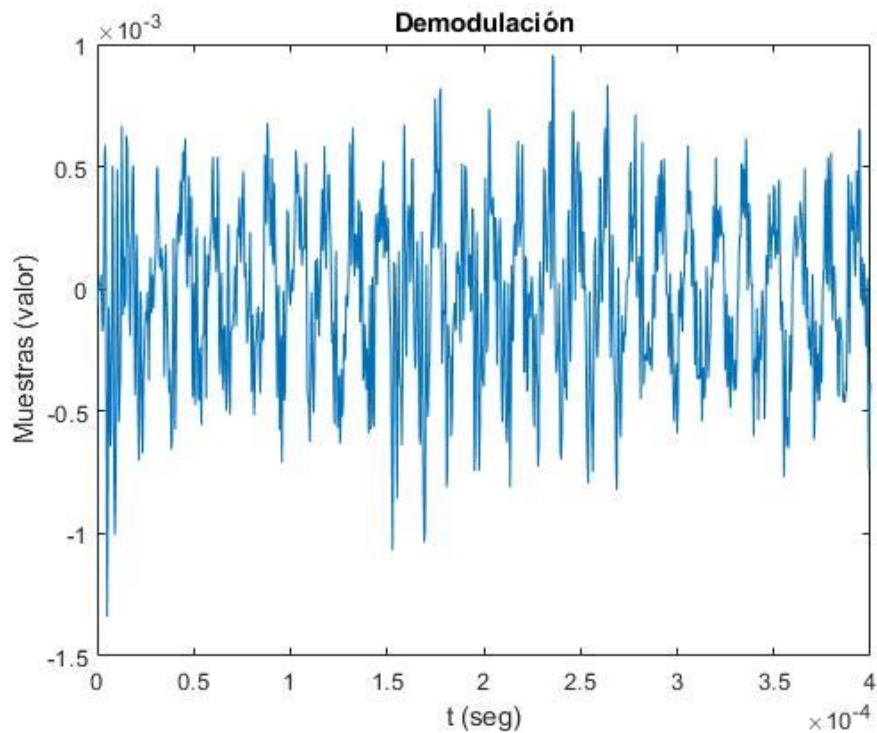


Figura 25. Demodulación de la señal ILS original. El eje x se corresponde con el tiempo y el eje y, se corresponde con el valor de las muestras

6.3. Desarrollo del código de demodulación en C

Tras haber llevado a cabo las simulaciones para la comprobación del funcionamiento correcto de nuestro dispositivo, se procedió al desarrollo del código en lenguaje de programación C de la función de MATLAB “amdemod”.

En una primera instancia se procuró realizar este desarrollo desde cero, por cuenta propia. Pero esto suponía una serie de problemas y complicaciones relacionados con las diferencias entre el lenguaje de programación en C y en MATLAB.

El lenguaje de programación de MATLAB nos permite realizar operaciones entre arrays y matrices sin necesidad de recorrerlos. Además, su código permite realizar multitud de operaciones matemáticas con ellos, que en otro lenguaje de programación supondría una gran carga para el procesador debido a la cantidad de bucles y condicionales necesarios para su funcionamiento.

Por ello, se terminó desarrollando dicho código mediante una herramienta integrada en MATLAB denominada MATLAB Coder [39]. Esta herramienta permite convertir una función de MATLAB en un conjunto de archivos escritos en lenguaje de programación C o C++, los cuales dependen unos de los otros y conforman la misma función.

Para ello, esta herramienta necesita en una primera instancia una función de formato “m” (formato de los archivos de MATLAB). Tras ello, comprobará que la función es correcta y que su código no genere discrepancias con su equivalente en código C o C++. A continuación, se le provee a la herramienta de un banco de pruebas basado en la utilización de la función a convertir, es decir, un script que utilice dicha función y le permita a MATLAB Coder determinar el tipo de datos de los parámetros de entrada de la función, si esta los tiene. También es posible definir el tipo de datos de estos parámetros de forma manual. Seguidamente la herramienta ejecuta el banco de pruebas anterior para comprobar de una forma más exhaustiva las discrepancias entre lenguajes de programación, por ejemplo, un array definido como 2x2 y a continuación convertirse en 1x1. Finalmente procede a la conversión a código C o C++, dependiendo de nuestra elección y nos muestra una visualización del código resultante, además de un conjunto de archivos dependientes unos de otros, entre los que genera un main, en el cual, explica de manera escueta como inicializar la función, y la llamada a dicha función.

6.4. Implementación de la demodulación en la RaspberryPi

Antes de la implementación del código generado en el capítulo anterior, se presentaba una cuestión. La recepción de la señal era almacenada en un archivo de formato wave, por lo cual debía encontrarse la manera de leer dicho archivo y recopilar toda la información necesaria de la señal. La mayoría de los campos de la señal eran fáciles de sustraer del código de la recepción, en cambio, la obtención de las muestras de la señal se convirtió en una ardua tarea.

Ante esta situación se recurrió a una librería denominada “*libsndfile*” [40], la cual, permitía la lectura de un archivo con formato wave, además de sustraer sus propiedades y sus muestras. Para ello se procedió a la descarga de dicha librería y sus dependencias en la propia Raspberry. Esta se ubicó en la carpeta “*/home/pi/libsndfile/*”.

El uso de la librería anterior nos permitía tener las muestras en crudo, que era precisamente lo que nuestra función producida por la herramienta de MATLAB requería. Los archivos de la función “amdemod” fueron ubicados en la ruta “*/home/pi/libsndfile/src/amdemod*”.

Para la cooperación de todos los recursos generados y los importados, se requería el desarrollo del código que podemos encontrar en el fichero “*demod.c*”.

Este código se encuentra explicado de forma escueta por medio de comentarios en el propio código. Básicamente, consiste en la lectura de un archivo de formato wave, la captación de sus propiedades y la recogida de muestras de la señal recibida. Tras ello se imprimen por pantalla unas cuantas muestras y se procede a la demodulación. Finalmente, se imprimen por pantalla algunas de las muestras demoduladas.

6.5. Simulación y desarrollo del cálculo de la DDM

El siguiente objetivo que nos encontramos fue el cálculo de la DDM, el cual nos permitiría determinar si la aeronave se encuentra desplazada respecto a la trayectoria ideal o no. Como consecución de las simulaciones realizadas anteriormente, ya disponíamos de una

señal ILS demodulada, con las muestras de la cual, poder realizar el cálculo de este concepto.

Como se comentó con anterioridad, no pudimos disponer de los recursos para la generación ni grabación de una señal ILS desfasada para comprobar que el cálculo del DDM se correspondía con dicho desfase.

Para su simulación básicamente se aplicaron dos filtrados paso banda para la obtención de las muestras a una frecuencia de 90Hz y 150Hz.

Tras simular una señal ILS sin desfasar, los resultados fueron concluyentes, ya que el cálculo de la DDM resultaba 0.000000223, lo cual es aproximadamente cero.

Por consiguiente, se procedió a la conversión del código escrito en lenguaje de MATLAB a código escrito en lenguaje C. Para ello, se recurrió a la herramienta comentada en puntos anteriores, MATLAB Coder. Como consecuencia, se obtuvo el código en lenguaje de programación C correspondiente con el cálculo de la DDM y, por lo tanto, podríamos comenzar con su implementación en la RaspberryPi.

A la hora de implementar dicho nuevo código en la RaspberryPi, se incorporó a la función main mostrada en el punto anterior. Para ello, se ubicaron los archivos correspondientes al cálculo de la DDM en la ruta `"/home/pi/libsndfile/src/ddm"`. El código adicional podemos observarlo en el mismo fichero, `"demod.c"`.

Como se aprecia, la función `"ddm"` necesita el paso de dos parámetros, `"sr"`, que se corresponde con la tasa de muestreo (sample rate), y `"z"`, que es el conjunto de muestras demoduladas. Y obviamente, devuelve el cálculo de la DDM

6.6. Implementación de un script de ejecución

A primera vista el código desarrollado en los puntos anteriores parece simple, pero a la hora de integración en un único script surgen problemas. Los problemas surgen en el ámbito de la compilación, y esto es debido a la cantidad de dependencias que posee el código de recepción, el cual fue bajado de un repositorio de código libre (GitHub).

Por ello se analizó el problema y se propuso una solución. Debido a las diferencias a la hora de compilar y las distintas dependencias que poseía cada script, se propuso

desarrollar un script único de ejecución, el cual solo llevara a cabo la ejecución y no la compilación.

Por tanto, debían compilarse los dos scripts creados por separado, por una parte, el script con el código de la recepción, y, por otra parte, el script con el código de la demodulación y el cálculo de la DDM. Como consecuencia se crearían dos archivos ejecutables, los cuales, serían tratados a través de un script bash.

El script bash se denomina “ILSReceiver.sh” y se ubica en la ruta “/home/pi/” y se ejecuta introduciendo 3 parámetros, “-f *frecuencia(MHz)*”, correspondiente con la frecuencia a la que graba las señales el receptor, “-w”, para el almacenamiento de dicha señal en un archivo de formato wave, y “-a *l*”, el cual permite la recepción a la tasa mínima del receptor a la hora de muestrear, 2.5MSPS. Es decir, “./ILSReceiver.sh -f 100 -w -a l”.

El código de dicho script bash, se muestra a continuación.

```
#!/bin/bash

cd airspyone_host-master/build/airspy-tools/src

./airspy_rx $1 $2 $3 $4 $5

cd ../../../../libsndfile/src/

./demod

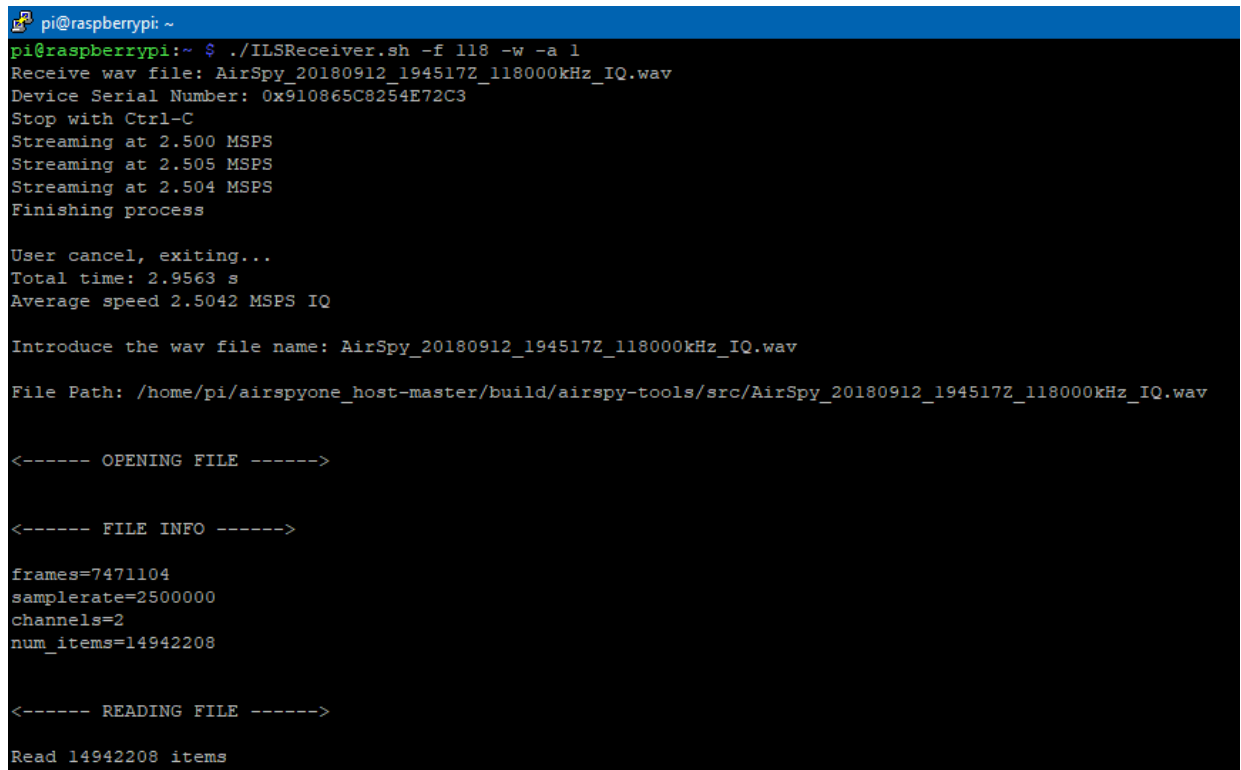
cd ../../airspyone_host-master/build/airspy-tools/src

rm -i *.wav
```

El cual consiste en ubicarse en la ruta correspondiente y llevar a cabo el ejecutable creado tras la compilación. Primero se ejecuta la recepción y seguidamente la demodulación y el cálculo de la DDM. Por último, pregunta al usuario si desea eliminar el archivo de formato wave grabado en el proceso de la recepción, ya que ocupa una memoria considerable en el dispositivo.

6.7. Resultados de la ejecución

Por último, se mostrarán los resultados obtenidos a la hora de llevar a cabo la ejecución del software. Para ello, se presentarán una serie de imágenes de los procesos llevados a cabo en la ejecución.



```
pi@raspberrypi: ~  
pi@raspberrypi:~$ ./ILSReceiver.sh -f 118 -w -a 1  
Receive wav file: AirSpy_20180912_194517Z_118000kHz_IQ.wav  
Device Serial Number: 0x910865C8254E72C3  
Stop with Ctrl-C  
Streaming at 2.500 MSPS  
Streaming at 2.505 MSPS  
Streaming at 2.504 MSPS  
Finishing process  
  
User cancel, exiting...  
Total time: 2.9563 s  
Average speed 2.5042 MSPS IQ  
  
Introduce the wav file name: AirSpy_20180912_194517Z_118000kHz_IQ.wav  
File Path: /home/pi/airspyone_host-master/build/airspy-tools/src/AirSpy_20180912_194517Z_118000kHz_IQ.wav  
  
<----- OPENING FILE ----->  
  
<----- FILE INFO ----->  
  
frames=7471104  
samplerate=2500000  
channels=2  
num_items=14942208  
  
<----- READING FILE ----->  
  
Read 14942208 items
```

Figura 26. Ejecución del software. Recepción de la señal y lectura del archivo con formato wave generado.

Como apreciamos en la Figura 26, se procede a la recepción de la señal en una frecuencia de 118Mhz con una tasa de muestreo de 2.5MSPS. Tras ello, se procede a la lectura del archivo con formato wave generado, en el cual se almacena toda la información de la señal incluidas sus muestras.

```
pi@raspberrypi: ~
<----- DEMODULATION ----->

<----- INITIAL SAMPLES ----->

##CHANNEL 1##          ##CHANNEL 2##
-0.0000305176          0.0000000000
0.0000000000          0.0000000000
-0.0000305176          0.0000000000
0.0000000000          0.0000000000

Please introduce Fc value: 60000

Please introduce phase value: 0

<----- DEMODULATED SAMPLES ----->

##CHANNEL 1##          ##CHANNEL 2##
-0.0000513005          0.0000707349
-0.0000401736          0.0000820639
-0.0000295770          0.0000903134
-0.0000195242          0.0000957574

<----- DDM CALCULATION ----->

Difference depth modulation: 0.0000000088

<----- END OF PROGRAM ----->
rm: remove regular file 'AirSpy_20180912_194517Z_118000kHz_IQ.wav'? y
pi@raspberrypi:~ $
```

Figura 27. Ejecución del software. Demodulación y cálculo de la DDM

En la Figura 27, podemos distinguir la impresión por pantalla de las muestras originales, y a continuación la impresión de las muestras demoduladas (Son solo algunas muestras, ya que la señal se compone de aproximadamente de 7 millones de estas). Seguidamente, se realiza el cálculo de la DDM. Y, por último, se pregunta al usuario si desea eliminar el archivo de audio generado.

7. ENTORNO SOCIOECONÓMICO

7.1. Impacto Socioeconómico

Mediante un análisis del impacto socioeconómico de nuestro proyecto, podemos observar unos pequeños cambios evolutivos con respecto al sistema utilizado actualmente, tales como, reducción de materias primas para su implementación, de costes de mantenimiento, y de dióxido de carbono, y un aumento de la seguridad y tranquilidad de las personas a bordo de una aeronave y de empleo.

- Reducción de materias primas. En este aspecto, nuestro receptor ILS ha sido implementado con un menor número de dispositivos que el embarcado en un avión de carga, además de ser embarcado en un dron, el cual, es fabricado con un menor número de piezas y en un espacio temporal menor que un avión.
- Reducción de costes de mantenimiento. Un avión de carga (sistema de calibrado utilizado actualmente) requiere un mantenimiento muy específico y actualmente de un gran coste económico, por no hablar del coste del combustible y del coste de los operarios que realizan estas tareas. También hay que destacar que el calibrado por parte del avión de carga se realiza una vez cada año, por lo que los costes de mantenimiento son muy elevados para que este sea utilizado tan solo una vez en cada aeropuerto (en España solo hay un avión de carga utilizado por todos los aeropuertos). En cambio, la disposición de una Raspberry, junto con un SDR, embarcados en un dron, supone un mantenimiento casi nulo aun utilizándolo todos los días del año.
- Reducción de dióxido de carbono. Al evitar el uso del avión de carga para la calibración, y en su lugar utilizamos un dron, reducimos considerablemente las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, ya que el combustible de los aviones, el queroseno, es altamente contaminante.
- Aumento de la seguridad. Uno de los objetivos de este proyecto es reducir la probabilidad de realizar un aterrizaje con dificultades. Es por ello por lo que se pretende realizar la calibración todos los días, y esto es posible debido a su embarcación en un dron. Todo esto proporciona una mayor seguridad al piloto de

que el sistema ILS funciona correctamente y por lo tanto proporciona una mayor confianza a las personas que viajan en este tipo de transporte. Mientras que el avión de carga solo realizaba una calibración al año.

- Aumento de empleo. Una de las posibles desventajas del desarrollo de este proyecto podría ser la reducción de empleo, pero no. El equipo actual dedicado al avión de carga es mayor que un posible equipo dedicado al seguimiento de un dron, pero este primer equipo es único, en cambio el hipotético equipo destinado al dron sería replicado en cada aeropuerto, es por ello que aumentarían los puestos de trabajo.

7.2. Presupuesto

Para el siguiente proyecto se ha desarrollado un presupuesto acorde con los recursos disponibles, el personal y el espacio estructural proporcionado.

Para ello se han tenido en cuenta una serie de costes. Costes del material y dispositivos utilizados, costes del software específico y los costes de recursos humanos y estructurales.

7.2.1. Costes materiales.

Estos costes son aquellos correspondiente con el hardware utilizado en dicho proyecto.

Pero para calcular dichos costes y cualquier otros necesitamos calcular el coste de amortización, ya que los costes reales no se corresponderían con el trabajo realizado.

$$C_a = \frac{\text{Coste real}}{\text{Vida útil}} \times T.\text{proyecto}$$

Es decir, que el coste de amortización (C_a) es igual al coste real dividido entre la su vida útil y multiplicado todo ello por el tiempo de desarrollo del proyecto.

Tabla 1. Costes del hardware

| Producto | Vida útil (meses) | Duración del proyecto (meses) | Coste real (€) | Coste de amortización (€) |
|-------------------------------|------------------------------|--|---------------------------|--------------------------------------|
| Portátil | 36 | 8 | 500 | 111.1 |
| Ratón | 60 | 8 | 10 | 1.33 |
| Teclado | 72 | 8 | 12 | 1.33 |
| Monitor | 108 | 8 | 200 | 14.81 |
| Conversor Hdmi-VGA | 36 | 8 | 8 | 1.77 |
| Airspy R2 | 24 | 8 | 200 | 66.66 |
| RaspberryPi 3B | 24 | 8 | 40 | 13.33 |
| Antena | 120 | 8 | 5 | 0.33 |

7.2.2. Costes de personal.

En este apartado vamos a tener en cuenta los costes que supondrían la contratación de personal por parte de la una determinada empresa, para la elaboración del proyecto. Por ello tendremos que tener en cuenta el grado de dicho personal. Supondremos la contratación de un ingeniero Junior y un ingeniero Senior asemejándose a la situación llevada a cabo por un alumno y su tutor.

Tabla 2. Costes de personal

| Rol | Horas estimadas | Costes por horas (€) | Coste total (€) |
|-------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Ingeniero Junior | 400 | 40 | 16000 |
| Ingeniero Senior | 150 | 60 | 9000 |

7.2.3. Costes del software.

En este punto se tendrán en cuenta sobre todo el coste de uso de las licencias de determinados o sistemas operativos.

Tabla 3. Costes del software

| Producto | Vida útil (meses) | Duración del proyecto (meses) | Coste real (€) | Coste de amortización (€) |
|-------------------------|------------------------------|--|-----------------------|--|
| Microsoft Office | 12 | 8 | 69 | 46 |
| Windows 10 | 12 | 8 | 145 | 96.66 |
| GitHub | - | 8 | 0 | 0 |
| Matlab R2018a | 12 | 8 | 69 | 46 |
| Raspbian | - | 8 | 0 | 0 |

7.2.4. Costes totales.

$$C_T = 210.66 \text{ (Costes hardware)} + 25000 \text{ (Costes personal)} \\ + 188.66 \text{ (Costes software)} = 25399.32 \text{ €}$$

Pero aquí no hemos tenido en cuenta los costes referentes al lugar de trabajo. Estos podrían considerarse el alquiler de una oficina y la contratación de banda ancha. Estos costes podrían estimarse entre el 15 y 21% del total. Por ello se ha considerado un 18% de costes indirectos.

Tabla 4. Costes Totales

| Costes | € |
|-----------------|----------|
| Coste Total | 25399.32 |
| Coste Indirecto | 4571.87 |
| Total | 29971.19 |

En la Tabla 4 se exponen los costes indirectos y su suma al resto de costes.

8. CONCLUSIONES Y FUTUROS HORIZONTES

EL sistema ILS es considerado en este momento un medio para llevar a cabo los aterrizajes con la mayor precisión y seguridad posibles, especialmente en condiciones de visibilidad nula para el piloto. Es por ello por lo que el desarrollo de este proyecto puede considerarse de gran ayuda para dicho sistema, ya que permite mejorar su fiabilidad mediante el calibrado diario a través de su embarcación en un dron. Además, permitirá reducir muchos gastos y evolucionar a un sistema mucho más ligero y que permite una mayor operabilidad.

Pese a no poder captar una señal ILS desfasada, debido a las políticas de los aeropuertos y a la no disposición de un generador de señales ILS en la universidad, creemos en la correcta implementación de nuestro receptor. Aunque cabe la posibilidad de incorporarle alguna especie de interfaz gráfica para poder visualizar de una manera más minuciosa el comportamiento de la DDM.

Actualmente se ha desarrollado un sistema ILS móvil. Dicho sistema ha sido adquirido por las Fuerzas Aéreas estadounidenses, y es denominado D-ILS. El motivo de su adquisición resulta bastante evidente, ya que, sin importar el lugar del mundo en el que se encuentren, pueden disponer de un sistema de radio ayudas en cualquier base militar y pudiendo ser instalado en tan solo cinco días [41].

En un futuro próximo, el sistema ILS será incorporado en todos los aeropuertos españoles (ya que no todos disponen en este instante de él), y siendo optimistas, podrá sustituirse el avión de carga por un dron por cada aeropuerto. Aunque se espera también el desarrollo de un nuevo sistema capaz de solventar los errores que sufre el sistema ILS ya sean las dificultades del terreno o las interferencias.

Aunque, por otra parte, también habrá que solventar otro problema. Las bandas de frecuencia FM son adyacentes a las bandas ILS, y el aumento de estas primeras nos supone una amenaza, ya que, como consecuencia, aumentarán las interferencias y el sistema podría ser ineficiente o incluso proporcionarnos una ayuda prácticamente nula a la hora de tomar tierra.

Basándonos en todo lo dicho este Trabajo de Fin de Grado, podríamos llegar a la conclusión de que se ha conseguido desarrollar un receptor ILS de muy bajo coste, apenas unos cientos de euros, con unas escasas dimensiones y un ligero peso. Todas estas características favorecen notablemente su embarcación en un dron y el ahorro que podrá suponer, sin perder eficiencia en la tarea de calibración.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] OACI, «OACI,» [En línea]. Available: https://www.icao.int/about-icao/Pages/ES/default_ES.aspx. [Último acceso: 2018].
- [2] O. Smarrelli, «Taller/Seminario para la implementación de infraestructura de navegación para soportar PBN y las operaciones de aproximación de precisión GNSS en la región NAM/CAR/SAM,» de *Consideraciones sobre el espectro de frecuencia para la infraestructura de navegación*, Lima, Perú, 2016.
- [3] ICAO, «ANAC,» 14 11 2013. [En línea]. Available: <http://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/normativa/anexos-oaci/anexo-10-vol-v.pdf>. [Último acceso: 2018].
- [4] ICAO, «ANAC,» 23 11 2006. [En línea]. Available: <http://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/normativa/anexos-oaci/anexo-10-vol-i.pdf>. [Último acceso: 2018].
- [5] G. d. España, «Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado,» 10 05 2014. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2014-4950>. [Último acceso: 2018].
- [6] G. d. España, «Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado,» 27 10 2017. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2017-12318>. [Último acceso: 2018].
- [7] G. d. España, «Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado,» 26 03 1986. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1986-7900>. [Último acceso: 2018].
- [8] RockwellCollins, «RockwellCollins,» [En línea]. Available: <https://www.rockwellcollins.com/Products-and->

Services/Defense/Navigation/Airborne-Products/Radio-Navigation/AN-ARN-147-V--VOR-ILS-GS-MB-Receiver.aspx. [Último acceso: 2018].

- [9] B. Systems, «Bae Systems,» [En línea]. Available: <https://www.baesystems.com/en-us/product/multimode-receivers-mmr>. [Último acceso: 2018].
- [10] S. n. A. a. S. Museum, «Air and Space,» [En línea]. Available: <https://airandspace.si.edu/collection-objects/multi-mode-receiver-mmr-laas-cert-collins-glu-925-global-landing-unit>. [Último acceso: 2018].
- [11] R. Collins, «Rockwell Collins,» [En línea]. Available: <https://www.rockwellcollins.com/Products-and-Services/Commercial-Aviation/Flight-Deck/Navigation-and-Guidance/GPS-Devices/GLU-925-Global-Landing-System.aspx>. [Último acceso: 2018].
- [12] «PIR361 Portable ILS/VOR Receiver Operating manual,» 2017.
- [13] Kavics, «Versys,» [En línea]. Available: <http://www.versys.fr/fournisseurs/kavics/>. [Último acceso: 2018].
- [14] E. A. Systems, «Precision Approach Systems,» 2018.
- [15] A. d. Zaragoza, «Cursos Cesa,» 26 06 2016. [En línea]. Available: <http://cursoscesa.es/aeropuerto-zaragoza-mejora-sistema-antiniebla/>. [Último acceso: 2018].
- [16] J. L. Á. Pérez, «Agamenon,» [En línea]. Available: <http://agamenon.tsc.uah.es/Asignaturas/it/rd/apuntes/handout7.pdf>. [Último acceso: 2018].
- [17] G. S. Alicante, «Glosarios Servidor Alicante,» 13 06 2016. [En línea]. Available: <https://glosarios.servidor-alicante.com/aviacion/altitud-de-decision-da-o-altura-de-decision-dh>. [Último acceso: 2018].
- [18] G. S. Alicante, «Glosarios Servidor Alicante,» 13 06 2016. [En línea]. Available: <https://glosarios.servidor-alicante.com/aviacion/alcance-visual-en-la-pista-rvr>. [Último acceso: 2018].

- [19] C. Delgado, «El Vuelo por Instrumentos,» 10 2015. [En línea]. Available: <http://elvueloporinstrumentos.blogspot.com/2015/10/sistema-de-aterrizaje-por-instrumentos.html>. [Último acceso: 2018].
- [20] R. Hispaviación, «Hispaviación,» [En línea]. Available: <http://www.hispaviacion.es/sistema-instrumental-de-aterrizaje-el-ils/>. [Último acceso: 2018].
- [21] MBDA, «Mi Blog de Aviación,» 10 08 2010. [En línea]. Available: <http://miblogdeaviacion.blogspot.com/2010/08/ils-o-aproximacion-por-instrumentos.html>. [Último acceso: 2018].
- [22] Ibadomar, «Los Gelves,» 17 3 2015. [En línea]. Available: <https://losgelves.com/2015/03/17/volando-a-ciegas-iii-el-inercial-y-el-ils/>. [Último acceso: 2018].
- [23] M. Lacagnina, «Flap 152,» 17 04 2013. [En línea]. Available: <http://www.flap152.com/2013/04/analizando-accidentes-senal-falsa-del.html>. [Último acceso: 2018].
- [24] E. Academy, «E-Fly Academy,» 22 01 2014. [En línea]. Available: <http://eflyacademy.blogspot.com/2014/01/como-aterrizar-si-no-ves-el-aeropuerto.html>. [Último acceso: 2018].
- [25] Taringa, «Taringa,» [En línea]. Available: <https://www.taringa.net/posts/info/1210339/ILS---Aterrizaje-por-Instrumentos.html>. [Último acceso: 19 09 2018].
- [26] C. Wood, «Navfltsm,» 1999. [En línea]. Available: <http://www.navfltsm.addr.com/ils.htm>. [Último acceso: 2018].
- [27] A. I. Gómez, «Cybercol,» [En línea]. Available: <http://www.cybercol.com/fs/escuela/ils1.html>. [Último acceso: 2018].
- [28] L. V. Valencia, «Bibing,» 2017. [En línea]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/71048/fichero/1048-VAQUERA.pdf>. [Último acceso: 2018].

- [29] E. P. a. Play, «Electrónica Plug and Play,» [En línea]. Available: <http://www.electronicaplugandplay.com/sistemas-embebidos/product/170-rpi3mb>. [Último acceso: 2018].
- [30] Raspberrypi, «Raspberrypi,» [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>. [Último acceso: 2018].
- [31] S. Radio, «SDR Radio,» [En línea]. Available: <https://www.sdr-radio.com/>. [Último acceso: 2018].
- [32] Airspy, «Airspy,» [En línea]. Available: <https://airspy.com/airspy-r2/>. [Último acceso: 2018].
- [33] J. C. P. S. A. G. Santiago Mejía, «Slideshare,» [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/SantiMe1/antenas-de-hilo>. [Último acceso: 2018].
- [34] Norauto, «Norauto,» [En línea]. Available: https://www.norauto.es/producto/varilla-antena-larga-norauto-sound_167076.html. [Último acceso: 2018].
- [35] Y. T. Benjamin Vernoux, «GitHub,» 24 09 2016. [En línea]. Available: https://github.com/airspy/airspyone_host. [Último acceso: 2018].
- [36] MathWorks, «MathWorks,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/audioread.html>. [Último acceso: 2018].
- [37] MathWorks, «MathWorks,» [En línea]. Available: https://es.mathworks.com/help/comm/ref/amdemod.html?s_tid=doc_ta.
- [38] V. S. Fernández, «Implementación de un receptor ILS mediante RaspberryPi embarcable,» Leganés, 2018.
- [39] MathWorks, «MathWorks,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/products/matlab-coder.html>.
- [40] E. d. C. Lopo, «Mega-Nerd,» 02 04 2017. [En línea]. Available: <http://www.mega-nerd.com/libsndfile/>. [Último acceso: 2018].

[41] G. Militar, «Galaxia Militar,» 29 11 2017. [En línea]. Available: <http://galaxiamilitar.es/un-ils-movil-para-la-fuerza-aerea-de-los-estados-unidos/>. [Último acceso: 2018].

[42] Anónimo, «Diagrama de Bloques Demodulación,» 2018.

ANEXO A: SUMMARY

1.Introduction

In few years, air transport has become the most used and reliable. This is due to the instruments shipped on airplanes, which have been developed over the last few years in this sector.

From the simplest instruments such as the Altimeter to more complex ones such as the Flight Management System are necessary when carrying out any flight.

Aviation has benefited enormously with the invention of the ILS (Instrumental Landing System) landing system. It consists of a radio aids system used since the mid-twentieth century, which allows to calculate the positioning of an airplane. With it, the landings are totally safe, reducing almost completely the risk of producing an error in adverse conditions for the pilot, such as bad weather conditions.

2. Instrumental Landing System

The landing phase is one of the most delicate in the field of aviation, since any failure can cause a serious accident. If we add to this the fact that weather complications such as fog or rain can arise, it can be almost impossible to perform the landing maneuver. Therefore, the ILS radio aids system emerged, which allows an aircraft to be guided with the greatest precision during the landing phase. The ILS is composed of two signals. One gives us a lateral guidance, while the other gives us a vertical guidance. With these two signals it can position the aircraft even in the most adverse weather conditions.

The ICAO defines margins of vision at the time of landing considering the proximity, category I, II and III.

We can see the three categories and their features in the next image.

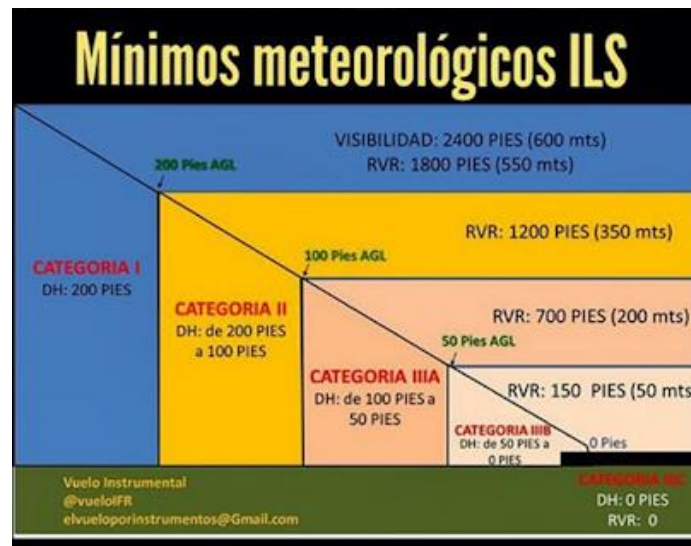


Figure 1. ILS Categories Scheme

The ILS system uses different components during the landing process before and after reaching the runway such as the localizer, the glide path and the beacons.

The localizer provides lateral guidance to the aircraft by transmitting two signals. This series of antennas transmit in the VHF band between the frequencies of 108.10MHz and 111.95MHz, which are the same as those transmitted by a radio-assisted system called VOR (Very High Frequency Omnidirectional Range).

Like the locator, it radiates two signals, one with an AM 90Hz modulation and another with AM modulation of 150Hz. The antenna of the glide path, unlike the locator, transmits in a frequency range between 328.6MHz and 335.4Mhz (UHF). The angle of the glide path must be between 2 and 4 degrees with respect to the horizontal, with the most used angle of descent being 3 degrees.

The mark beacons are a system of radio aids, located along the final ILS approach path to detail the positioning of a certain area. They operate in a VHF frequency range of 75 MHz, that is, at low power. They are usually seen visually in the instruments of the plane, or also sonorously, depend on the plane and its instruments on board.

Normally two mark beacons are used, OM (Outer Marker) and MM (Medium Marker), although in some cases, a last beacon called IM (Inner Marker) is also used.

We can see in the next image a scheme of all components of ILS system.

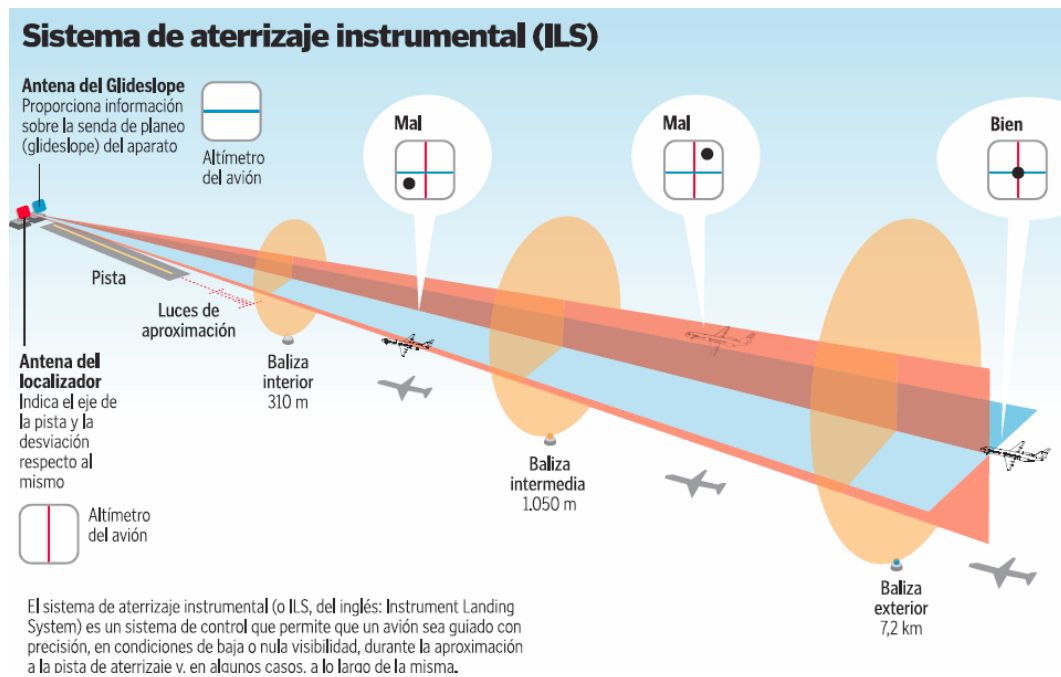


Figura 2. ILS system Description

3. Used devices and features

The tools that we have finally arranged are a RaspberryPi 3 model B, an SDR (Software Defined Radio) called Airspy R2, and a small wire antenna

A RaspberryPi is a computer board consisting of a Broadcom processor, a RAM, a GPU, several USB ports, HDMI, Ethernet, 40 GPIO pins, camera connector and 3.5 mm jack for audio devices. The ROM is inserted by means of an SD card which in this case has a memory of 8GB (GigaBytes).

Its processor should allow us to perform computationally expensive operations, due to its 1.2GHz with 64 bits of CPU, and without forgetting clearly its capacity of 1GB of RAM. For this reason, it is considered one of the best options for the pre and post processing of data.

The Airspy allows us to receive in bands of frequencies between 24 and 1700MHz with sample rates of between 2.5 and 10MSPS (Mega Sample Per Second) for IQ signals, although we should use the lower rate, in this case 2.5MSPS for devices such as

Raspberry, due to be low power devices. In addition, it has an external clock input between 10 and 100MHz.

A wire antenna is a device capable of emitting or receiving electromagnetic waves during AM or FM transmissions. In this case the wire antennas are very commonly used in the VHF, UHF, HF and MF bands, in addition their radiant elements are wire conductors.

4. Receiver development

First, we proceeded to develop Raspberry software, which would allow us to receive the ILS signal and be able to store it in a wave file format. After carefully analyzing the possibility of implementing the software on my own, it was concluded that it was a rather complicated and laborious task. That is why it was decided to resort to an open source platform called GitHub. In it we found some drivers and the source code, which allowed us to receive the Airspy R2.

The next step was to demodulate the stored signal through the mathematical program called MATLAB. That means, carry out the simulation of an AM demodulation to check the correct functioning of the receiver.

Then, a series of signals was collected for its analysis both temporally and in frequency through the MATLAB program. The signals received were not ILS, since the necessary tools for their generation were not available, nor were permits for their reception at airports. Therefore, it was simple breasts or square signs, with which, we tested the correct reception of the receiver. Although, later with the help of another partner the capture of ILS signals was achieved.

Following on from the simulations, we proceeded to receive the ILS signals, which are the objective of this receiver. In Figure 3 we can see one of these signals in the time domain.

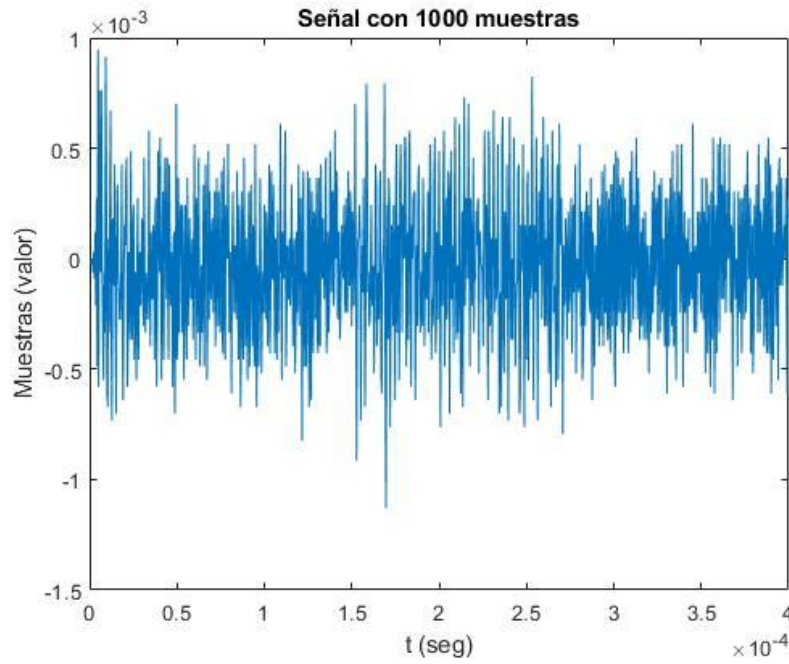


Figure 3. ILS signal received on the 108.9MHz frequency. 1000 samples of the original signal were taken. The x-axis corresponds to the time and the y-axis, the samples value

The simulation of the demodulation was carried out by representing 1000 samples from only one of the two channels. We can appreciate the results in Figure 4.

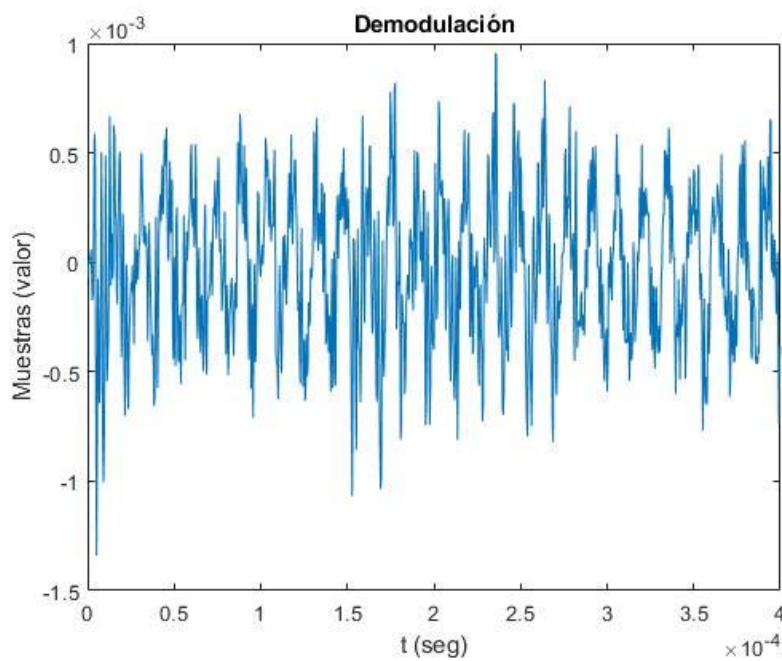


Figura 4. Demodulation of the original ILS signal. The x axis corresponds to the time and the y axis, corresponds to the samples value

After having carried out the simulations for the verification of the correct functioning of our device, we proceeded to the development of the code in programming language C of the MATLAB function "amdemod".

This code was developed by means of a tool integrated in MATLAB called MATLAB Coder. This tool allows you to convert a MATLAB function into a set of files written in C or C ++ programming language, which depend on each other and make up the same function.

Before the implementation of the generated code, a question was presented. The reception of the signal was stored in a file of wave format, so the way to read said file and collect all the necessary information of the signal had to be found. Most of the signal fields were easy to subtract from the reception code, however, obtaining the signal samples became an arduous task.

Given this situation, a library called "libsndfile" was used, which allowed the reading of a file with wave format, in addition to subtracting its properties and samples. To do so, we proceeded to download the library and its dependencies on Raspberry.

The next objective that we found was the calculation of the DDM, which would allow us to determine if the aircraft is displaced with respect to the ideal trajectory or not.

For its simulation basically two bandpass filters were applied to obtain the samples at a frequency of 90Hz and 150Hz.

After simulating not out of phase ILS signal, the results were conclusive, since the calculation of the DDM was 0.000000223, which is approximately zero. Therefore, the code written in MATLAB language was converted to code written in C language. To do this, the tool commented in previous points, MATLAB Coder, was used.

Finally, the results obtained will be shown when carrying out the software execution. For this, a series of images of the processes carried out in the execution will be presented.

```

pi@raspberrypi: ~
pi@raspberrypi:~ $ ./ILSReceiver.sh -f 118 -w -a 1
Receive wav file: AirSpy_20180912_194517Z_118000kHz_IQ.wav
Device Serial Number: 0x910865C8254E72C3
Stop with Ctrl-C
Streaming at 2.500 MSPS
Streaming at 2.505 MSPS
Streaming at 2.504 MSPS
Finishing process

User cancel, exiting...
Total time: 2.9563 s
Average speed 2.5042 MSPS IQ

Introduce the wav file name: AirSpy_20180912_194517Z_118000kHz_IQ.wav

File Path: /home/pi/airspyone_host-master/build/airspy-tools/src/AirSpy_20180912_194517Z_118000kHz_IQ.wav

<----- OPENING FILE ----->

<----- FILE INFO ----->

frames=7471104
samplerate=2500000
channels=2
num_items=14942208

<----- READING FILE ----->

Read 14942208 items

```

Figure 5. Software execution. Signal reception and wave file reading.

```

pi@raspberrypi: ~
<----- DEMODULATION ----->

<----- INITIAL SAMPLES ----->

##CHANEL 1##          ##CHANEL 2##
-0.0000305176          0.0000000000
0.0000000000          0.0000000000
-0.0000305176          0.0000000000
0.0000000000          0.0000000000

Please introduce Fc value: 60000

Please introduce phase value: 0

<----- DEMODULATED SAMPLES ----->

##CHANEL 1##          ##CHANEL 2##
-0.0000513005          0.0000707349
-0.0000401736          0.0000820639
-0.0000295770          0.0000903134
-0.0000195242          0.0000957574

<----- DDM CALCULATION ----->

Difference depth modulation: 0.0000000088

<----- END OF PROGRAM ----->
rm: remove regular file 'AirSpy_20180912_194517Z_118000kHz_IQ.wav'? y
pi@raspberrypi:~ $

```

Figure 6. Demodulation software execution

5. Conclusions

The ILS system is considered at this time a means to carry out landings with the greatest possible precision and safety, especially in conditions of zero visibility for the pilot. That is why the development of this project can be considered a very helpful for this system, since it allows to improve its reliability by calibrating daily through a drone. In addition, it will reduce many expenses and evolve to a much lighter system that allows more operability.

Soon, the ILS system will be incorporated in all Spanish airports (since not all of them currently have it), and being optimistic, the cargo plane can be replaced by one drone for each airport. Although it is expected also the development of a new system capable of solving the errors suffered by the ILS system whether they are terrain difficulties or interference.

Based on everything said this Project, we could reach to the conclusion that it has been possible to develop a very low-cost ILS receiver, paying just a few hundred euros, with a few dimensions and a light weight. All these features improve its embarkation in a drone and the savings that may result, without losing efficiency in the task of calibration.